INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DESCONCIERTO CÓSMICO | COLÉMBOLOS | LA INTERSEXUALIDAD EN EL DEPORTE
N.º 535
ABRIL 2021

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Abril 2021 • N.º 535 • 6,90 € • investigacionyciencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

DESCONCIERTO CÓSMICO

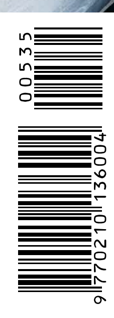


La constante cosmológica esconde uno de los principales enigmas de la física. ¿Puede resolverse?

COMUNICACIÓN
La divulgación científica en la era de la desinformación

ECOLOGÍA
Colémbolos: los cuidadores de los suelos

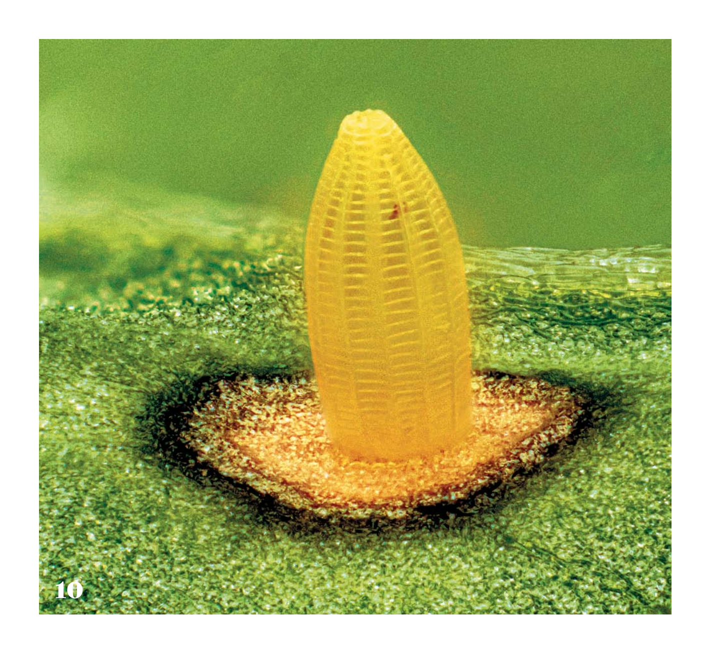
DEPORTE
Intersexualidad y discriminación en el deporte profesional

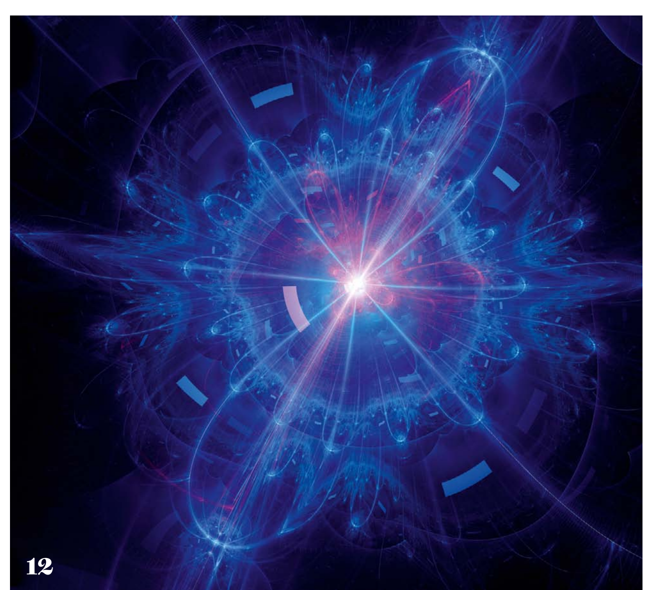




YURI SMITYUK TASS, VIA GETTY IMAGES

ARTÍCULOS


10


12



84

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La constante cosmológica, un término introducido por Einstein en 1917 en sus ecuaciones de la relatividad general, conecta varios conceptos clave, como la energía del vacío cuántico y la expansión acelerada del universo. Sin embargo, hasta hoy nadie ha sido capaz de explicar su ínfimo valor: un misterio que a menudo ha sido calificado como el mayor problema abierto de la física teórica. Getty Images/StationaryTraveller y Julia Krupenina/iStock, modificado por IyC.

redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo 2021

MARIPOSAS EN TIEMPOS DE PANDEMIA

Acerca del artículo «El declive de las mariposas mediterráneas», de Constantí Stefanescu [Investigación y Ciencia, marzo de 2021], me planteo dos cuestiones. La primera tiene relación con la formación de los voluntarios: ¿cómo se forman? Aunque en el artículo se dice que es fácil reconocer las distintas especies de mariposas, no me parece tan sencillo... ¿Se les exige algún tipo de formación académica? La segunda cuestión guarda relación con la pandemia actual: ¿cómo han afectado los confinamientos y las limitaciones de la movilidad a la recogida de datos? ¿Han perjudicado a algún proyecto concreto?

Lucía de la Cruz
L'Hospitalet, Barcelona

Responde Stefanescu: *La identificación de especies de mariposas puede no ser una tarea sencilla, al menos para ciertos grupos de especies y en zonas particularmente diversas. Sin embargo, hoy existe una profusa información de gran calidad sobre las mariposas ibéricas, lo que facilita un aprendizaje rápido. Nuestro equipo de coordinación proporciona abundante material de formación a los voluntarios, así como un continuo soporte personalizado que incluye visitas periódicas para resolver dudas metodológicas y de identificación. Además, los voluntarios tienen acceso a un foro interno del proyecto donde pueden hacer preguntas, intercambiar fotografías y resolver dudas. Y aquellos voluntarios que comienzan sin experiencia previa sobre mariposas pasan por un período de formación de entre uno y dos años antes de que los datos que obtengan se consideren válidos. En todo caso, la participación no requiere una formación académica especial, sino solo aprender a reconocer las especies que aparecen en los lugares donde realizan los censos.*

En efecto, las restricciones de movimiento de la primavera pasada supusieron la pérdida de un número considerable de datos de 2020. Por fortuna, algunas personas realizaron los censos por encargo de parques naturales y otros organismos públicos, en cuyo caso pudieron salir con los permisos correspondientes, excepto durante el confinamiento domiciliario más riguroso. Esos datos fueron de gran utilidad porque permitieron construir las curvas de vuelo de las especies, los cuales se emplean para estimar los contajes en semanas sin datos reales. Las perspectivas para este año son mejores, ya que contamos con permisos para que los voluntarios puedan salir a censar, dado que esta actividad no supone contacto con otras personas y que el riesgo de contagio es mínimo.

METÁFORAS OFUSCADORAS

Uno de los artículos del número de Investigación y Ciencia del mes de marzo está repleto de palabras como estas: «fuerza policial», «desobediencia», «civilización», «tramposo», «ladrón», «deslealtad», «transgresión»... Parecería un artículo de temática social ¿verdad? Pues no: todos estos adjetivos y sustantivos no se aplican al mundo de las personas, sino al de las células tumorales [«Las células tramposas en el cáncer», por Athena Aktipis; Investigación y Ciencia, marzo de 2021].

> «Es cierto que las metáforas son muy útiles en ciencia. Pero también pueden limitar su desarrollo»
> —*Cecilia Ramos (Madrid)*

Es cierto que las metáforas son muy útiles en ciencia. Pero también pueden limitar su desarrollo. Y si condicionan demasiado la visión de un fenómeno, pueden resultar más ofuscadoras que iluminadoras. La autora es psicóloga de formación (una ciencia mucho más afín a las personas que a las células) y el trabajo se enmarca en el Proyecto Generosidad Humana, «un esfuerzo por comprender el compartir, la generosidad y la cooperación a través de las culturas», que dirige también el antropólogo Lee Cronk. ¿Qué tienen que ver las culturas, la cooperación y la generosidad humanas con las células? Lo considero un salto excesivo.

Si seguimos tirando del hilo, vemos que el proyecto mencionado está financiado, entre otras instituciones, por la Fundación Templeton, de clara inspiración espiritual. La dimensión espiritual del ser humano es fundamental y todos los esfuerzos para que nuestras sociedades sean más humanas son más que necesarios. Pero intentar comprender el cáncer mediante modelos más propios de la psicología, la sociología o la antropología me parece, cuando menos, sorprendente.

Cecilia Ramos
Madrid

Erratum corrige

Por un error de edición, en la reseña El reciclaje no es como nos lo habían contado [por Fernando T. Maestre; Investigación y Ciencia, febrero de 2021], se dice erróneamente que «el porcentaje de residuos que van al contenedor amarillo en España [...] va desde el 25 hasta casi el 80 por ciento». Tales cifras no se refieren a los residuos depositados, sino a la tasa de reciclaje (la fracción de los residuos que acaban convirtiéndose en nueva materia prima).

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



El lobo gigante y el lobo gris se encontraron durante el Pleistoceno superior.




FUENTE: «DIRE WOLVES WERE THE LAST OF AN ANCIENT NEW WORLD CANID LINEAGE», ANGELA R. PERRI ET AL. EN *NATURE*, VOL. 591, PÁGS. 87-91, MARZO DE 2021.

PALEONTOLOGÍA

Los lobos gigantes no eran lobos

Un enorme cánido extinto proporciona un ejemplo de evolución convergente

El lobo gigante es una fiera emblemática. En los pozos de alquitrán de La Brea, en Los Ángeles, se han encontrado los restos de miles de ejemplares de este carnívoro del Pleistoceno, que tuvo un papel destacado en la serie de televisión *Juego de tronos*. Pero un nuevo estudio de su genética ha sorprendido a los paleontólogos: lejos de ser un lobo, sería el último miembro de un linaje de cánidos surgido en Norteamérica.

Desde que fuera descubierto en la década de 1850, el lobo gigante ha cautivado nuestra imaginación. Sus fósiles se han hallado en gran parte del continente americano, desde Idaho hasta Bolivia. El betún que aflora en La Brea deja constancia de que las presas atrapadas en el alquitrán atrajeron a muchos de estos depredadores de la Edad de Hielo a una muerte segura. Los restos conservados en el alquitrán revelan un cazador imponente de hasta 1,80 metros de largo, con unas mandíbulas y un cráneo adaptados para abatir a presas de la megafauna.

Aunque estaba claro que este cánido había evolucionado para dar caza a mastodontes, caballos, bisontes y otros grandes herbívoros presentes en América, las semejanzas entre su esqueleto y el del lobo gris actual apuntaban a un parentesco cercano. Durante mucho tiempo, los paleontólogos han supuesto que el lobo gigante se extendió por Norteamérica antes de que el lobo gris procedente de Eurasia siguiera sus pasos a través del puente de tierra de Beringia. Ahora, algunos restos de ADN bien conservados podrían cambiar de raíz esa historia.

El nuevo estudio, publicado en *Nature*, nació de un intento por desentrañar las características biológicas

básicas del lobo gigante. «Para mí, todo comenzó con la decisión de recorrer EE.UU. en busca de muestras de este lobo y ver qué podíamos lograr, puesto que nadie había conseguido extraer su ADN hasta entonces», explica Angela Perri, arqueóloga de la Universidad de Durham y coautora del estudio. Otro de los autores, el genetista Kieren Mitchell, de la Universidad de Adelaida, también estaba intentando extraer y estudiar ADN antiguo de los restos de lobo gigante, igual que otros laboratorios que acabaron colaborando en el proyecto.

Los investigadores pretendían dilucidar el parentesco del lobo gigante con los demás lobos. «Tenía la sospecha de que el lobo gigante era un linaje especializado o una subespecie del lobo gris», relata Mitchell. Pero los nuevos datos no refrendan esa hipótesis: los primeros análisis genéticos indican que no eran parientes cercanos. «Creo que hablo por todo el grupo si digo que los resultados constituyeron una gran sorpresa», admite Perri.

Al secuenciar el genoma de cinco fósiles de lobo gigante de entre 13.000 y 50.000 años de antigüedad, los científicos descubrieron que pertenecían a un linaje mucho más antiguo de cánidos. Los datos sugieren que el lobo gigante surgió en América y no mantenía lazos cercanos con el lobo gris de Eurasia: la última vez que compartieron un ancestro común fue hace unos 5,7 millones de años. Según los investigadores, la gran semejanza entre ambos sería un ejemplo de evolución convergente, un fenómeno que se produce cuando especies distintas desarrollan adaptaciones (o incluso apariencias) similares por el hecho de tener un modo de vida parecido. En ocasiones esa convergencia solo es superficial, como en las aves y los murciélagos, ambos dotados de alas pese a su anatomía dispar. En el caso del lobo gris y el lobo gigante, la especialización en la caza de grandes herbívoros dio como resultado dos linajes de cánidos que adquirieron de forma independiente un mismo aspecto lupino.

«Estos hallazgos trastocan totalmente la idea de que los lobos gigantes no eran sino primos más voluminosos del lobo gris», afirma Grant Zazula, paleontólogo del Gobierno de Yukón ajeno al nuevo estudio. De hecho, debido a la semejanza entre ambos, el lobo gris se ha tomado como modelo de la biología y la conducta del lobo gigante, desde la dinámica de las manadas hasta el sonido de los aullidos. La nueva identidad del lobo gigante obligará a revisar muchas suposiciones, entre ellas el aspecto que tenía en vida. «El estudio del ADN y las proteínas que se conservan en los huesos fosilizados está reescribiendo con rapidez la historia natural de los mamíferos norteamericanos, desde las glaciaciones hasta los tiempos más recientes», subraya Zazula.

El descubrimiento implica que el lobo gigante podría necesitar un nuevo género que deje claro que no pertenece al del lobo gris, *Canis*. Perri, Mitchell y sus colaboradores proponen *Aenocyon*, un nombre acuñado hace un siglo que significa «lobo terrible». Pero los investigadores no confían en que sus resultados acaben con la costumbre, y es probable que a *Aenocyon dirus* se le siga llamando lobo gigante. «Se unirá a otros animales que reciben el nombre de lobo sin serlo, como el lobo de crin», vaticina Perri.

El estudio también es relevante de cara a dilucidar las razones de la extinción del lobo gigante al final de la última glaciación. Este depredador se especializó durante millones de años en la caza de camélidos, équidos, bisontes y otros herbívoros norteamericanos, y su desaparición se produjo en paralelo a la de sus presas. «A diferencia del lobo gris, que es un modelo de adaptación, parece que

ARQUEOLOGÍA

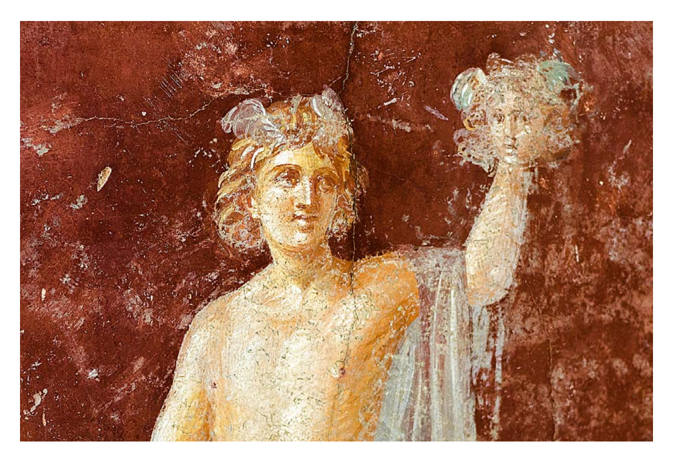
Fresco en peligro

Las sales corrosivas suponen una amenaza para las pinturas murales de Pompeya

Cubierta por cenizas y rocas volcánicas procedentes de la erupción del Vesubio, la antigua ciudad de Pompeya permaneció sepultada más de 1500 años antes de que la descubrieran y se iniciaran las excavaciones. La mayoría de los arqueólogos confían en que los restos volcánicos preserven las ruinas que continúan enterradas, pero un nuevo trabajo sugiere que esos materiales, llamados piroclastos, también pueden provocar daños en determinadas circunstancias.

En un artículo publicado en *Angewandte Chemie International Edition*, los investigadores sostienen que los lixiviados generados cuando esos piroclastos se ven expuestos al agua contienen iones fluoruro, partículas cargadas que pueden combinarse con otros iones para formar una costra salina sobre las vívidas pinturas murales de Pompeya. La disolución y recristalización de esas sales puede alterar los colores de los pigmentos, crear grietas o causar otros desperfectos.

Cuando Maite Maguregui, química de la Universidad del País Vasco, y sus colaboradores detectaron sales de flúor en algunos murales de Pompeya exhumados con anterioridad, sospecharon que los piroclastos eran los responsables. «Para nosotros, el flúor era un marcador de los efectos del material piroclástico», explica Maguregui. Los iones fluoruro no abundan en la atmósfera, pero los volcanes los expulsan en sus cenizas y escombros.



GETTY IMAGES/FLORY/ISTOCK

Para demostrar que los fluoruros provenían de los piroclastos de Pompeya, los investigadores analizaron en el laboratorio muestras de ceniza y roca volcánica obtenidas a distintas profundidades. Comprobaron que esos fragmentos liberaban iones fluoruro al entrar en contacto con el agua, y calcularon que la concentración de dichos iones podría dar lugar a sales como las halladas sobre las pinturas.

Los murales de Pompeya que permanecen enterrados están relativamente a salvo si se mantienen secos, señala Maguregui. Pero las aguas subterráneas y la lluvia propician que los iones formen sales perjudiciales incluso bajo tierra. El daño empeora de manera drástica cuando las pinturas están al aire, pues eso acelera la producción de sales.

«Creo que esto hará saltar algunas alarmas, porque las pinturas exhumadas pueden deteriorarse muy rápido si no se tratan de forma

el lobo gigante era mucho menos flexible y no supo hacer frente a los cambios ambientales y en las presas», opina Perri.

Tampoco parece que el lobo gigante haya dejado un legado genético, más allá del ADN degradado que contienen sus restos óseos. Otros cánidos, como el lobo y el coyote, pueden aparearse entre sí y engendrar híbridos, pero aparentemente el lobo gigante no hizo eso con ningún otro cánido que viva en la actualidad. Perri, Mitchell y sus colaboradores no hallaron en el ADN indicios de hibridación entre los lobos gigantes y el lobo gris o el coyote.

Hace 13.000 años el lobo gigante encaraba la extinción. Haber surgido en el duro y variable ambiente de Eurasia pudo conferir una ventaja al lobo gris, explica Zazula. «Por contra, el final de la última glaciación cogió desprevenido al terrible lobo gigante mientras se relajaba en el sur de California.». Aun así, el aparente final de la historia de este carnívoro no es más que el principio. Los genes conservados han mostrado que el lobo gigante y sus ancestros prevalecieron en América durante más de cinco millones de años, y los primeros capítulos de su historia natural aguardan a ser reescritos.

—*Riley Black*

adecuada», valora Austin Nevin, director de conservación del Instituto de Arte Courtauld de Londres, que no participó en el estudio. Los arqueólogos deben buscar fluoruro y otros iones en las pinturas nada más desenterrarlas, añade Nevin, a fin de tomar las medidas oportunas para preservarlas.

Las señales de los iones fluoruro y los correspondientes átomos de flúor son demasiado débiles para captarlas con los equipos portátiles habituales. Por ello, el grupo de Maguregui ha desarrollado una nueva técnica de detección sobre el terreno: un instrumento láser descompone una mínima cantidad de piedra caliza sobre la superficie de una pintura exhumada, lo que libera calcio. Y este interacciona con el flúor que haya en las inmediaciones para formar fluoruro de calcio, un compuesto que emite luz con una longitud de onda característica.

Tales mediciones podrían proporcionar una alerta temprana, pero los investigadores aún deben determinar el mejor método para tratar las pinturas y mitigar los daños que causan esas sales. Entretanto, defiende Nevin, si se detecta flúor en un mural recién exhumado, quizá lo mejor sea simplemente volver a enterrarlo.

—*Lakshmi Supriya*

ECOLOGÍA

Arrugas vegetales protectoras

Descubierto un curioso mecanismo foliar de defensa contra los insectos

Las plantas han desarrollado un impresionante arsenal de estrategias para repeler a los insectos voraces. Entre las mejor conocidas destacan las toxinas de sabor repugnante, las resinas pegajosas y las espinas aguzadas. Pero ahora los científicos han descubierto otro ejemplo más: arrugas microscópicas que dificultan la marcha sobre las hojas.

Los pliegues se forman en multitud de cutículas foliares (el recubrimiento que limita la evaporación de agua, canaliza el intercambio gaseoso y protege la planta contra las bacterias y los hongos nocivos). Publicada en *Royal Society Open Science*, la novedosa investigación describe que, además de la superficie ya de por sí resbalosa de la cutícula, las minúsculas arrugas actúan como elemento disuasorio contra los pequeños intrusos. Muy probablemente estas se hacen más pronunciadas a medida que la hoja madura y la cutícula gana en grosor y extensión.

«Las plantas son unas supervivientes natas», cuenta Dana MacGregor, botánica molecular de Rothamsted Research, en Inglaterra, que no ha participado en el estudio. «Disponen de estrategias refinadas para alterar la anatomía, la bioquímica o la fisiología e impedir que los herbívoros devoren sus hojas. Este es un ejemplo más de cómo modifican su morfología para asegurar la supervivencia.»

Para el experimento, los investigadores crearon réplicas de silicona de hojas del árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*) en diversas etapas de crecimiento. Esto permitió medir los efectos de las propiedades estructurales de la hoja sin el componente deslizante que introduce el recubrimiento ceroso de la cutícula.

Luego pegaron unos sensores minúsculos a los élitros de ocho escarabajos pateteros (*Leptinotarsa decemlineata*) con el fin de medir las fuerzas de tracción durante su marcha por la hoja artificial. Mientras que los intrusos caminaron con facilidad sobre las réplicas de hojas nuevas y lisas, sobre las más maduras, provistas de arrugas, resbalaron.

«Nos sorprendió el modo en que brotaron las arrugas foliares y el notable efecto que tuvieron en el agarre del insecto en las distintas etapas de desarrollo», explica Venkata Surapaneni, biomecánico en la Universidad de Friburgo, en Alemania, y autor principal del estudio. A Surapaneni, que participa en el programa europeo de investigación PlaMatSu, le interesa el desarrollo de polímeros que imiten esas arrugas microscópicas para obtener superficies repelentes a los insectos. También especula con la posibilidad de seleccionar o manipular las plantas para que desarrollen más arrugas, lo que supondría un modo de reducir la aplicación de plaguicidas en la agricultura.

—*Monique Brouillette*



Una gota de cera de abeja ha permitido fijar un minisensor al escarabajo de la imagen, que camina por la superficie de una hoja de silicona.

DE «SPATIO-TEMPORAL DEVELOPMENT OF CUTICULAR RIDGES ON LEAF SURFACES OF *HEVEA BRASILIENSIS* ALTERS INSECT ATTACHMENT», MARC THIELEN ET AL EN *THE ROYAL SOCIETY OPEN SCIENCE*, 4 DE NOVIEMBRE DE 2020

Las barras muestran las horas diarias de luz y oscuridad para cada latitud.

Sin luz solar · 12 horas · 24 horas

Los relojes muestran los minutos de luz solar ganados o perdidos respecto al día anterior.

0 · 5 minutos · 10 · 15

Luz ganada

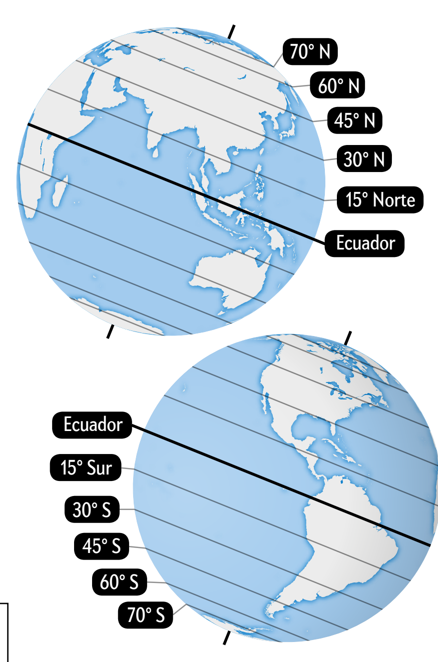
Luz perdida

Tiempo →

Equinoccio · Solsticio · Equinoccio · Solsticio

19 ene. 2021 · 18 feb. · 20 mar. · 20 abr. · 20 may. · 20 jun. · 22 jul. · 22 ago. · 22 sept. · 22 oct. · 21 nov. · 21 dic.

70° N · 60° N · 45° N · 30° N · 15° N · Ecuador · 15° S · 30° S · 45° S · 60° S · 70° S



A 45 grados de latitud norte (en Mineápolis o Burdeos, por ejemplo), la variación diaria en el tiempo de luz solar es de dos minutos casi exactos en enero, mayo, julio y noviembre, y de más de tres minutos en marzo y septiembre.

CIENCIAS DE LA TIERRA

La marcha irregular de la luz del día

Las horas de luz cambian de manera desigual a lo largo del año

Quienes viven en latitudes medias gozan del máximo número de horas de luz durante el solsticio de verano y soportan el máximo número de horas de oscuridad durante el de invierno. Entre esos dos extremos, el tiempo de luz solar aumenta o disminuye cada día, pero esa variación no es constante: es menor a mitad del verano y del invierno, y mayor en torno a los equinoccios de primavera y otoño. En esas dos épocas del año, las variaciones más acusadas ocurren cerca de los polos y conducen a unos dos meses en los que el sol nunca se pone o nunca sale. A lo largo del ecuador no se producen cambios: hay 12 horas de día y noche durante todo el año.

—Mark Fischetti

FUENTE: CALCULADORA SOLAR DE LA NOAA; JEN CHRISTIANSEN Y MAPPING SPECIALISTS (*gráficos*)

PALEOBIOLOGÍA

Algas depredadoras

Cuando la luz solar se esfumó, los diminutos cocolitóforos se transformaron en cazadores

El asteroide que chocó contra la Tierra hace 66 millones de años no solo aniquiló los dinosaurios, sino que redujo la vida en los mares a un mero caldo primitivo de microorganismos sencillos. Los científicos creen que lo que impidió el desmoronamiento absoluto de los ecosistemas marinos fueron las algas recubiertas de placas que pueden alimentarse de otros organismos pero conservan al mismo tiempo su capacidad fotosintética. Fue así como mantuvieron la base de las complejas redes tróficas del reino marino a través de aquel largo episodio de oscuridad.

El plancton depredador pertenecía a una familia de algas unicelulares, llamadas cocolitóforos, dotadas de placas calcificadas. Existen desde hace unos 200 millones de años y muchas vagan todavía como parte del plancton marino actual. Su supervivencia tuvo una especial trascendencia tras la gran extinción que puso fin al período Cretácico, cuando los escombros lanzados por la colisión del asteroide y las cenizas de los incendios que esta desató ocultaron el sol por espacio de dos años. La vida experimentó un largo «invierno por impacto» que prácticamente paralizó toda la actividad fotosintética.

«Al igual que sucede en tierra firme, las redes tróficas de los océanos tienen como base la fotosíntesis, pero en el medio marino la llevan a cabo las bacterias y las algas microscópicas», explica Samantha Gibbs, paleontóloga de la Universidad de Southampton y autora principal de un nuevo estudio publicado en *Science Advances*. Los cocolitóforos eran en el Cretácico uno de esos transformadores de energía, y cerca del 90 por ciento de sus especies se extinguieron a raíz del impacto.

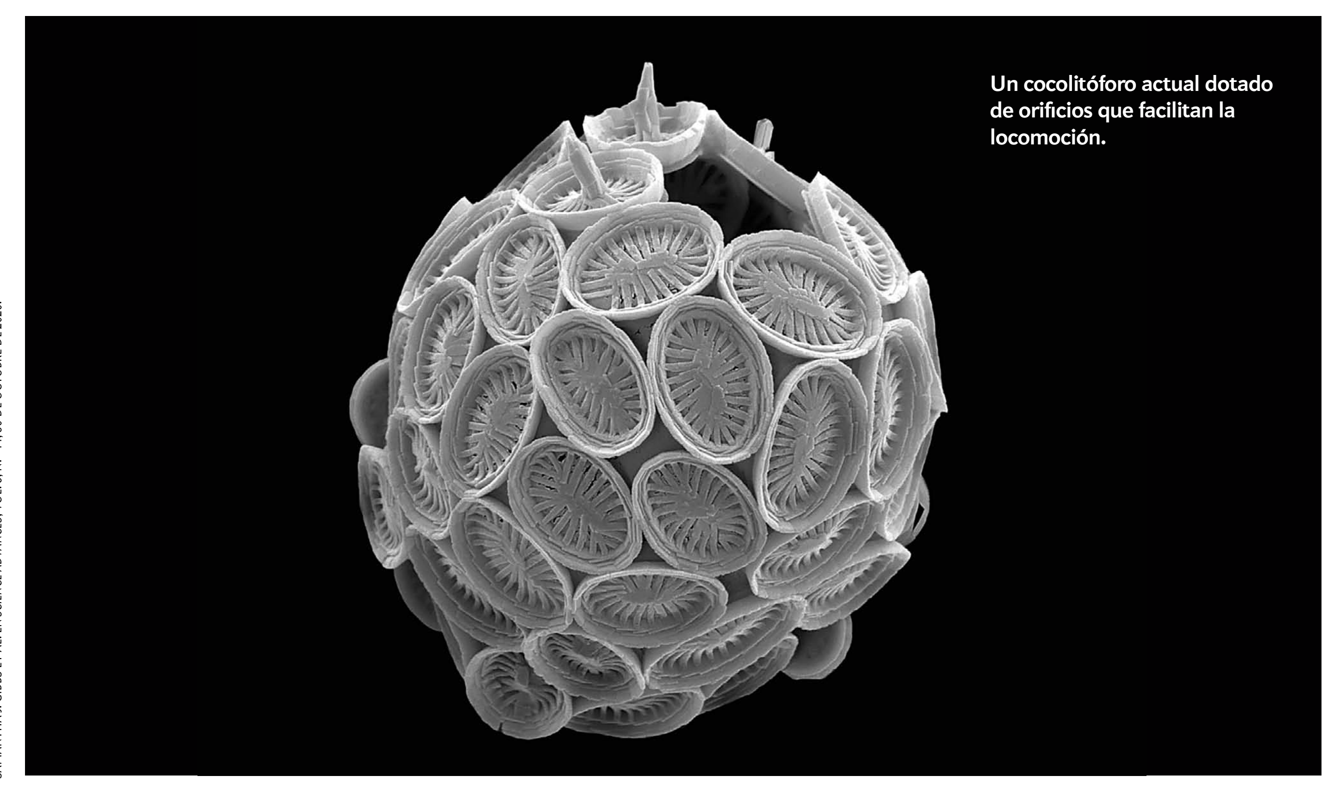
Desprovistas de luz con la que satisfacer sus necesidades energéticas, explica Gibbs, «las pocas especies supervivientes se dedicaron a capturar y devorar otros organismos». Los pequeños orificios visibles en los cocolitóforos fósiles indican que estos supervivientes estaban dotados de flagelos que les imprimían movimiento y la posibilidad de perseguir otros microorganismos. Los investigadores estudiaron la abundancia de estas algas cazadoras en el registro fósil y modelizaron su evolución para averiguar cómo pudieron sobrevivir y adaptarse a la desaparición del sol, y cómo proliferaron de nuevo después de que reapareciera.

Hace tiempo que los expertos se preguntan cómo resistieron la ausencia de la luz solar los organismos fotosintéticos como los cocolitóforos. «Es un descubrimiento verdaderamente interesante que contribuye de manera decisiva a explicar una paradoja aparente de la extinción», opina del estudio Christopher Lowery, paleontólogo de la Universidad de Texas en Austin, ajeno a él.

El modelo también explicaría los cambios en otros organismos. Los diminutos foraminíferos acusaron del mismo modo las consecuencias del impacto, pero resistieron. Provistos también de placas duras, a los supervivientes les crecieron espinas que probablemente usaron junto con tentáculos minúsculos para atrapar presas más grandes, explica Lowery, lo cual refuerza la idea de que otros organismos unicelulares adoptaron esos mismos hábitos alimentarios.

Con el tiempo la luz regresó y los cocolitóforos supervivientes reanudaron la actividad fotosintética y revitalizaron las redes tróficas marinas. Las algas diminutas y hambrientas ayudaron a salvar los mares.

—Riley Black



Un cocolitóforo actual dotado de orificios que facilitan la locomoción.

DE «ALGAL PLANKTON TURN TO HUNTING TO SURVIVE AND RECOVER FROM END-CRETACEOUS IMPACT DARKNESS», SAMANTHA J. GIBBS ET AL. EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 6, N.º 44, 30 DE OCTUBRE DE 2020.

BIOLOGÍA

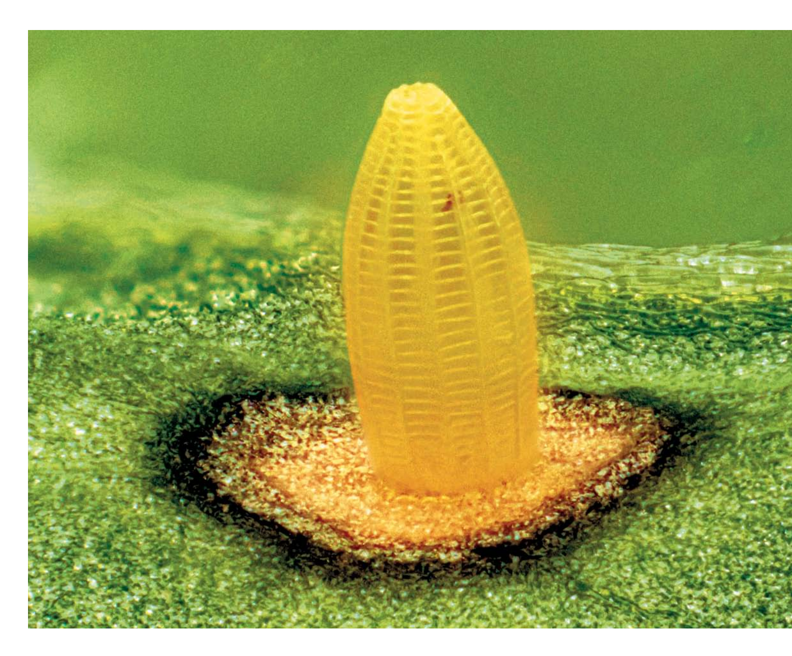
Defensa vegetal contra las mariposas

Algunas plantas marchitan el tejido foliar para matar los huevos de los lepidópteros

Algunas brasicáceas, la familia a la que pertenecen la col y la mostaza, pagan un alto precio para repeler a las voraces orugas: marchitan las partes de las hojas donde las mariposas hacen su puesta. Privados de un sustrato vivo, los huevos se desecan y mueren. Esta estrategia vegetal ya se conocía por lo menos desde los años 80 del pasado siglo, pero un nuevo estudio revela que se da solo en un pequeño grupo de plantas estrechamente emparentadas dentro de dicha familia, y que la desencadenan solo ciertas especies de lepidópteros.

Nina Fatouros, de la Universidad de Wageningen, y sus colaboradores investigaron 31 especies de la familia de plantas en cuestión. Primero aplicaron a sus hojas un líquido que había estado en contacto con huevos de una especie de mariposa que pone huevos en ellas. Cuatro especies muy cercanas entre sí dejaron marchitar las partes de las hojas tratadas de ese modo. Otros experimentos confirmaron que la especie que mostraba la respuesta más potente reaccionaba solo cuando el huevo pertenecía a un género concreto de mariposas, *Pieris*, que en la naturaleza hace la puesta en esas plantas. Ello demuestra que la especie de lepidóptero habría estimulado la evolución de la defensa necrosante, asegura Fatouros. Los autores también examinaron las puestas de otras mariposas silvestres con el fin de confirmar que la marchitación defensiva deseca los huevos o los hace caer. El trabajo se describe con detalle en *New Phytologist*.

«Es muy improbable que el hallazgo resulte casual», asegura Jurriaan Ton, biólogo molecular vegetal de la Universidad de Sheffield, ajeno al estudio. Añade que el parentesco entre las plantas, aunado con su reacción exagerada a esas mariposas, apunta



Una hoja se marchita en torno a un huevo de mariposa.

a una enconada «carrera armamentista» evolutiva entre las plantas y los insectos.

«Por lo que sé, este es el primer estudio en que se ha explorado esa adaptación en una familia botánica en concreto», afirma la ecóloga Julia Koricheva, de la Royal Holloway, de la Universidad de Londres, que no ha participado en la investigación.

Los futuros estudios podrían abordar la pregunta de cuándo surgió ese rasgo, añade Fatouros. La autora señala que las carreras armamentistas raramente acaban y los indicios apuntan a que las mariposas estarían contraatacando. Algunas optan por poner los huevos en racimos, lo que las hace menos vulnerables a la estrategia de marchitación.

—Chris Baraniuk

EPIDEMIOLOGÍA

Una vacuna para el tigre

Una estrategia heterodoxa ayudaría a los amenazados tigres del Amur

En 2003, una joven tigresa del Amur aparentemente desorientada se adentró en un pueblo ruso fronterizo con China. Científicos de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre (WCS, por sus siglas en inglés), de EE.UU., la anestesiaron y averiguaron que padecía moquillo canino: el primer caso confirmado en un tigre salvaje. La tigresa murió seis semanas después.

Desde entonces, esta infección vírica intratable que infecta a carnívoros de todo tipo se ha propagado entre los tigres del Amur por todo el área de distribución de esta subespecie en el extremo oriente de Rusia. Ahora, un nuevo análisis exhaustivo indica que, de seguir su curso, el virus del moquillo canino podría exterminar una población clave de este felino amenazado. Sin embargo, dicho riesgo podría paliarse vacunando a los tigres, según los autores.

«Hemos averiguado que el moquillo puede afectar notablemente a las poblaciones silvestres de tigre, en especial a las pequeñas», afirma Martin Gilbert, veterinario de fauna y epidemiólogo en la Universidad Cornell y autor principal del estudio, publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Añade que las poblaciones reducidas de otras especies vulnerables también podrían correr peligro.

Con el objetivo de predecir los efectos del moquillo a largo plazo, el equipo simuló la dinámica de la enfermedad en las dos mayores poblaciones del felino en la región, de medio millar y una treintena de individuos, respectivamente. Así se comprobó que, en el próximo medio siglo, el moquillo agrava un 65 por ciento el riesgo de extinción de la población más pequeña, que por su ubicación es esencial para repoblar el noreste de China.

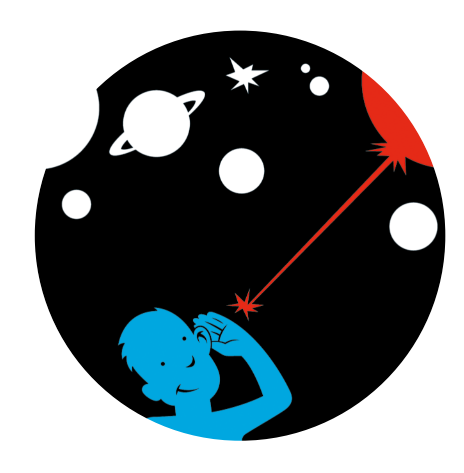
Al comparar las secuencias genéticas del virus en diversas especies infectadas, los investigadores también descubrieron que los tigres contraen principalmente el moquillo de otros animales silvestres, por lo que no bastaría con vacunar a los perros domésticos, que

HANS M. SMID

ÓPTICA

Mejores comunicaciones espaciales

Usar láseres en vez de ondas de radio podría revolucionar la transmisión de datos desde el espacio profundo



Una nueva técnica láser podría servir para mejorar la calidad de las comunicaciones espaciales, lo cual nos ayudaría a expandir nuestra última frontera.

Ahora mismo, gran parte de las transmisiones espaciales se basan en señales de radio. Pero estas se difractan y se ensanchan a medida que se propagan, igual que la luz o cualquier otra onda electromagnética. Si enviamos un haz de radio desde la Luna a la Tierra, «por lo general divergirá hasta alcanzar el tamaño de un continente», explica Peter Andrekson, investigador en fotónica de la Universidad Tecnológica Chalmers, en Suecia, y coautor de un reciente estudio publicado en *Light: Science and Applications*. En cambio, prosigue, «un haz láser solo se ensancharía hasta un radio de unos dos kilómetros».

Para captar las señales de radio de misiones espaciales como las que exploran Marte se necesita una antena muy grande. Los receptores más anchos de la NASA miden 70 metros de diámetro, señala Bryan Robinson, ingeniero de comunicaciones ópticas en el Laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que no tomó parte en el estudio. «Son como campos de fútbol sobre una montura, orientados hacia Marte.»

Las comunicaciones vía láser podrían funcionar con receptores de unos 20 centímetros de diámetro (el tamaño de una pizza individual), y los haces láser pueden transportar mucha más información que las ondas de radio. Pero las señales láser se transmiten con menor potencia y, una vez recibidas, se requiere una enorme amplificación para procesarlas.

El nuevo receptor manipula las interacciones entre los fotones para aumentar la señal entrante sin perder calidad, una técnica denominada amplificación sensible a la fase. Se trata de un enfoque «muy interesante», valora Robinson, porque los amplificadores actuales generan «ruido» que produce distorsiones. Usando un montaje de laboratorio que imita el vacío del espacio profundo y añade difracción para simular la distancia, el sistema experimental logró recibir información libre de ruido a una velocidad sin precedentes de 10,5 gigabits por segundo. El próximo reto es superar la distorsión causada por la atmósfera terrestre.

En 2013, el Laboratorio Lincoln y la NASA probaron con éxito otro tipo de transmisión láser entre una nave espacial y la Tierra. Como receptor emplearon un detector de fotones individuales, que cuenta las partículas de luz que chocan contra él. El sistema permite codificar los datos numéricamente y los transmite de forma muy eficaz, pero el contador solo funciona a –270 grados Celsius. En cambio, los receptores de amplificación sensible a la fase operan a temperatura ambiente.

Aunque presente grandes desafíos, refinar sistemas de comunicación óptica como los descritos sería «fundamental», asegura la planetóloga Tanya Harrison, que no participó en ninguno de los proyectos. Harrison está cartografiando Marte mediante un satélite y se siente frustrada por las limitaciones de las transmisiones de radio. Actualmente, los datos viajan de Marte a la Tierra con la velocidad y fiabilidad de un módem de principios de los 90. Según Harrison, un satélite en órbita alrededor del planeta rojo «puede adquirir muchos más datos de los que es capaz de enviar; hay una diferencia de un orden de magnitud. Haríamos mucha más ciencia si dispusiéramos de comunicaciones ópticas».

—Joanna Thompson

---

suelen considerarse el principal reservorio de la enfermedad. Si cada año se vacunase solo a dos tigres de la población más pequeña aprovechando las labores habituales de seguimiento, se reduciría un 75 por ciento el riesgo de extinción del grupo.

«Sin duda alguna, la vacunación contra el moquillo ayudaría a las pequeñas poblaciones aisladas y amenazadas de este gran felino, como las descritas en el extremo oriente de Rusia», asegura Ed Ramsay, catedrático emérito de medicina animal en la Universidad de Tennessee, que no ha participado en la investigación. «Los estudios indican que las vacunas son seguras, y la experiencia con los leones asiáticos de la India demuestra que incluso un programa de vacunación incompleto evitaría muertes.»

A pesar de todo, podría ser difícil obtener el apoyo necesario. «La vacunación sigue suscitando serias dudas entre los gestores de fauna como herramienta de conservación», afirma Sarah Cleaveland, veterinaria y epidemióloga comparada de la Universidad de Glasgow y una de las firmantes del estudio. «Esperamos que nuestra investigación aclare algunos problemas que envuelven las incertidumbres científicas, pues, como ocurre con la desconfianza que generan las vacunas en la salud humana, también existe desinformación y bastantes temores injustificados sobre los riesgos que la vacunación entraña para la fauna.»

—Rachel Nuwer



Tigre del Amur

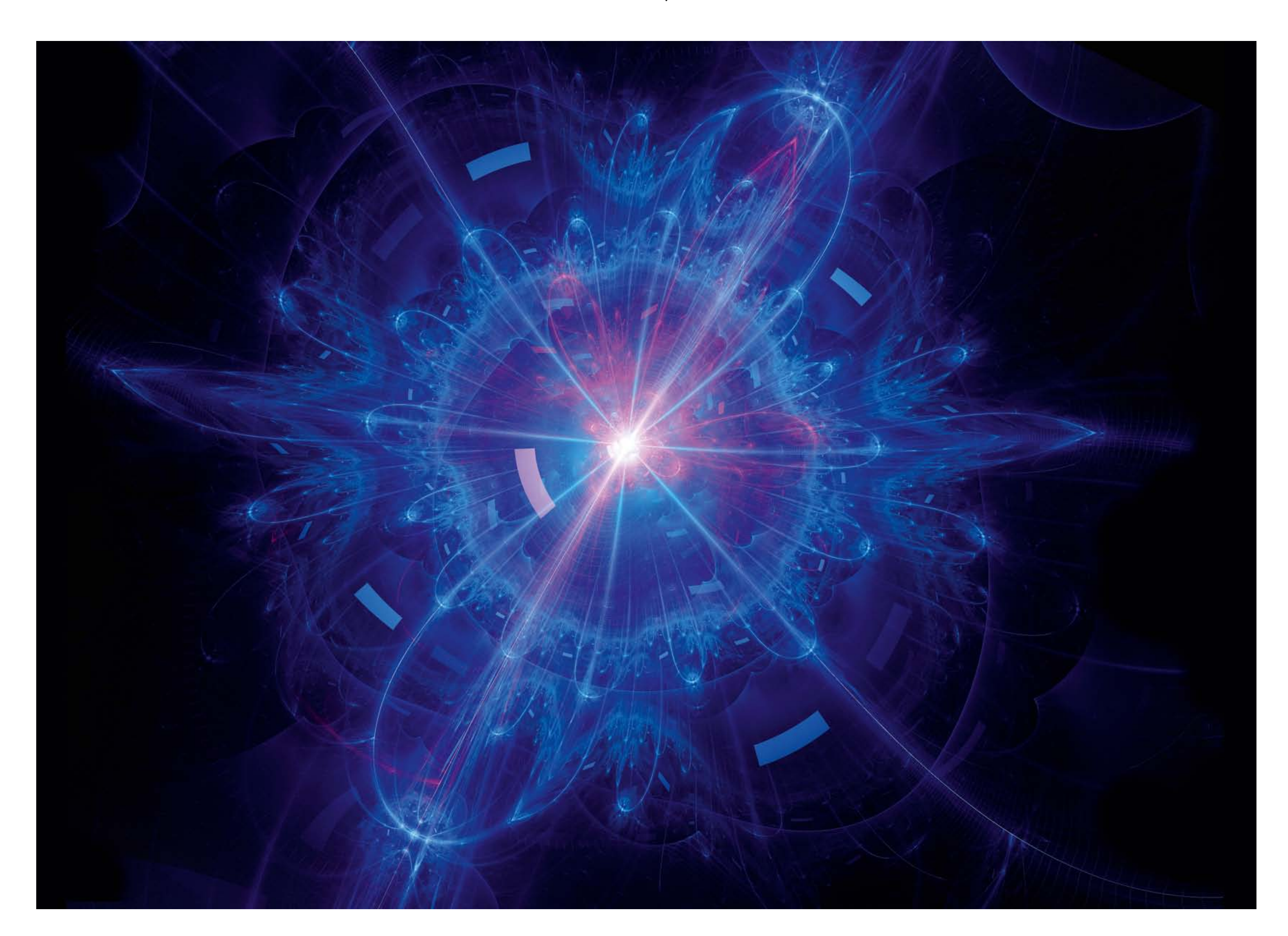
THOMAS FUCHS (*láser espacial*); JEANNETTE RUDLOFF ZONAR GMBH Y ALAMY STOCK PHOTO (*tigre*)

FÍSICA NUCLEAR

Resuelto un persistente misterio de la fisión nuclear

Un experimento responde a una pregunta que desde hacía décadas intrigaba a los físicos: cómo y cuándo comienzan a girar los fragmentos resultantes de un proceso de fisión

CHARLES Q. CHOI



LA FISIÓN NUCLEAR es el proceso por el que un núcleo atómico radiactivo se divide en otros núcleos menores. Un trabajo reciente ha esclarecido cómo se genera el momento angular de los productos atómicos.

GETTY IMAGES/SAKKMESTERKE/ISTOCK

Hacía más de 40 años que un misterio relativo al mundo subatómico desconcertaba a los físicos: ¿por qué, cuando un núcleo atómico se divide, los fragmentos resultantes emergen girando? Ahora, un nuevo trabajo ha hallado que el origen de este intrigante proceso podría hallarse en un mecanismo similar al que tiene lugar cuando se rompe una goma elástica.

Para entender por qué este fenómeno resulta tan extraño, piense en una pila muy alta de monedas. Una torre así será inestable, por lo que a nadie le sorprendería que acabara derrumbándose. Sin embargo, lo que nadie esperaría ver es que, al caer al suelo, todas las monedas comenzaran a girar.

Al igual que la pila de monedas, los núcleos atómicos con un gran número de protones y neutrones son también inestables. Pero, en lugar de derrumbarse, son propensos a dividirse en otros núcleos menores, un proceso conocido como fisión nuclear. Sin embargo, esos fragmentos salen girando, lo que resulta especialmente asombroso cuando el núcleo que se dividió no estaba girando en un primer momento. Y, al igual que no esperaríamos que un objeto sobre el

que no actúa ninguna fuerza comenzara a moverse, tampoco esperaríamos que un objeto sobre el que no actúa ningún momento de giro empezara a rotar, ya que eso parecería una violación de la conservación del momento angular.

Dicho proceso «hace que parezca que algo se ha creado de la nada», afirma Jonathan Wilson, físico nuclear del Laboratorio Irene Joliot-Curie de la Universidad de París-Saclay y autor principal del nuevo trabajo, en el que también han participado investigadores del Instituto de Física Corpuscular de Valencia y la Universidad Complutense de Madrid, entre otras instituciones. «Con ello la naturaleza nos muestra un alarde de prestidigitación: comenzamos con un objeto que no gira, pero que, cuando se divide, expulsa fragmentos que sí lo hacen. Aunque, por supuesto, el momento angular debe seguir conservándose», continúa el experto.

Resultados contradictorios

Los físicos saben desde hace tiempo que el proceso de fisión nuclear comienza cuando un núcleo adopta una forma que lo hace inestable debido a la repulsión entre protones. Dado que estas partículas están dotadas de carga positiva, tienden a alejarse unas de otras. Y a medida que un núcleo adopta una forma cada vez más alargada, comienzan a emerger dos fragmentos entre los cuales se forma un cuello de botella. Cuando el núcleo acaba por desintegrarse, esos trozos se separan con rapidez y el cuello se rompe, un proceso conocido como escisión.

En las últimas décadas, los físicos han propuesto cerca de una docena de teorías para explicar por qué los fragmentos resultantes salen girando, apunta Wilson. Tales explicaciones caen en dos grandes clases. Algunas apuntan a que el momento angular se genera antes de la escisión debido al retorcimiento y la torsión que, antes de que el núcleo se divida, producen las partículas que lo componen debido a las excitaciones térmicas, las fluctuaciones cuánticas, o ambas. Otra serie de teorías postulan que el momento angular aparece después de la escisión debido a fuerzas como la repulsión entre los protones de los fragmentos. Sin embargo, «los resultados de los experimentos que habían evaluado estas posibilidades eran contradictorios entre sí», añade Wilson.

Ahora, Wilson y sus colaboradores han determinado de forma concluyente que el espín se genera después de la división del núcleo. «Los nuevos datos son maravillosos», opina George Bertsch, físico nuclear de la Universidad de Washington en Seattle que no participó en la investigación. «Es realmente un avance importante en nuestra comprensión de la fisión nuclear.» Los resultados del estudio se publican en *Nature*.

En su trabajo, los autores examinaron los núcleos resultantes de la fisión de varios isótopos inestables: torio-232, uranio-238 y californio-252. En particular, analizaron los rayos gamma emitidos durante el proceso de fisión, los cuales contienen información sobre el momento angular de los fragmentos.

Si el giro apareciese debido a algún efecto anterior a la escisión, cabría esperar que los dos fragmentos tuvieran espines de igual magnitud y sentido opuesto. «Esto no es lo que observamos», afirma Wilson. En su lugar, cada fragmento parece girar de manera independiente, tal y como han observado los investigadores en todos los isótopos examinados.

Los físicos creen que, cuando un núcleo se alarga y se divide, sus restos comienzan pareciéndose a gotas. Cada uno de ellos posee una cualidad similar a la tensión superficial, la cual les impulsa a reducir su superficie y a adoptar una forma esférica más estable, de manera similar a lo que ocurre con una pompa de jabón, explica Wilson. La liberación de esa energía hace que los restos se calienten y giren: algo parecido a lo que ocurriría con una goma elástica que hemos estirado hasta el punto de ruptura y que, como resultado, se divide en fragmentos que se agitan de forma caótica.

Wilson añade que esta imagen se complica porque cada fragmento nuclear no se parece a un trozo de goma uniforme, sino más bien a un saco lleno de abejas zumbando, dado que las partículas que lo componen se agitan y a menudo colisionan entre sí. «Son como dos enjambres en miniatura que se separan y comienzan a hacer sus propias cosas.»

«Estos hallazgos apoyan con firmeza la idea de que es la forma de los núcleos en el momento en que se separan lo que determina su energía y las propiedades de los fragmentos», indica Bertsch. «Se trata de un avance importante para lograr que la teoría de la fisión nuclear sea más predictiva y nos permita analizar con más confianza cómo genera los distintos elementos», añade.

Una razón por la que Wilson cree que los estudios previos no habían conseguido deducir el origen del fenómeno es porque no contaban con las ventajas de los detectores modernos de ultraalta resolución ni con los métodos actuales de análisis computarizado de datos. Además, los trabajos anteriores solían centrarse en explorar la estructura de los núcleos superpesados y ricos en neutrones, a fin de comprobar hasta qué punto la teoría nuclear estándar podía explicar esos casos tan inusuales. Y gran parte de esos estudios habían renunciado a recopilar y analizar la enorme cantidad de datos necesarios para investigar el momento angular de los fragmentos nucleares. En cambio, el nuevo trabajo se ha centrado explícitamente en examinar esos detalles. «Para mí, lo más sorprendente de la medición es que haya podido llevarse a cabo y que haya arrojado resultados tan claros», expone Bertsch.

Simular un reactor nuclear

Wilson advierte que aún queda trabajo por delante para determinar con exactitud cómo se genera el espín tras la escisión del núcleo. «Sin duda, nuestra teoría es simplista», reconoce. «Puede explicar alrededor del 85 por ciento de las variaciones que vemos en el momento angular en función de la masa. Pero está claro que una teoría mejor podría hacer predicciones más precisas. Es un punto de partida; es lo único que afirmamos.» El investigador añade que un grupo del Centro Común de Investigación (JRC) de la Unión Europea en Geel (Bélgica) ha confirmado sus observaciones por medio de una técnica diferente y que sus resultados también deberían publicarse en breve.

Estos hallazgos no solo prometen resolver un misterio de décadas de antigüedad, sino contribuir al diseño de mejores reactores nucleares. En concreto, podrían ayudar a entender la naturaleza de los rayos gamma emitidos por los fragmentos nucleares durante la fisión, los cuales pueden calentar el núcleo del reactor y los materiales circundantes. Hoy en día, estos efectos de calentamiento no se conocen bien, sobre todo en lo referente a su variación entre los distintos sistemas de energía nuclear.

«Hay hasta un 30 por ciento de discrepancia entre los modelos y los datos sobre estos efectos de calentamiento», indica Wilson. «Nuestros hallazgos no son más

que una parte de la imagen global que nos gustaría tener para poder simular futuros reactores; aún necesitamos la imagen completa.»

Asimismo, el resultado podría ayudar a entender qué elementos superpesados pueden sintetizarse en el laboratorio y, con ello, profundizar en la aún turbia estructura de la materia nuclear. «En teoría deberían existir unos 7000 núcleos atómicos, pero en el laboratorio solo somos capaces de crear unos 4000», explica Wilson. «Entender cómo se genera el espín en los fragmentos de fisión puede ayudarnos a deducir a qué estados nucleares podemos acceder.»

«Aunque la fisión se descubrió hace 80 años, es tan compleja que hoy en día seguimos viendo resultados interesantes», observa Wilson. «Su historia no está completa, aún nos quedan muchos experimentos por hacer.»

Charles Q. Choi
es redactor colaborador de Scientific American

PARA SABER MÁS

Angular momentum generation in nuclear fission. Jonathan N. Wilson et al en *Nature*, vol. 590, págs. 566–570, 24 de febrero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Núcleos con forma de pera. C. J. (Kim) Lister y Jonathan Butterworth en *IyC*, enero de 2014.
Una diferencia de masas trascendental. Frank Wilczek en *IyC*, septiembre de 2015.
La isla de los pesos pesados. Christoph E. Düllmann y Michael Block en *IyC*, mayo de 2018.

INMUNOLOGÍA

¿Dejará de transmitirse la COVID-19 gracias a las vacunas?

El control de la pandemia necesitará vacunas que detengan la propagación del virus, una propiedad difícil de medir

SMRITI MALLAPATY

A medida que los países van desplegando las vacunaciones para protegerse de la COVID-19, se estudia si las inyecciones también consiguen que los vacunados dejen de infectarse y de contagiar el SARS-CoV-2. Las vacunas que impidan la transmisión ayudarán a tener controlada la pandemia si se administraran a suficientes personas.

Los análisis preliminares sugieren que algunas vacunas probablemente consigan detener la transmisión del virus. Pero no es fácil confirmar este efecto ni su contundencia, porque una caída de las infecciones en una región dada podría explicarse por otros factores, como los confinamientos y los cambios en las costumbres. Además, como los portadores asintomáticos también propagan el virus, se complica mucho la detección de dichas infecciones.

Según el epidemiólogo de enfermedades infecciosas Marc Lipsitch, de la Facultad de Salud Pública T. H. Chan de la Universidad Harvard, «estos estudios son de los más difíciles de llevar a cabo. Todos esperamos con avidez extraer alguna información de los escasos datos que vayan apareciendo».

¿Se detendrán las infecciones?

Aunque en la mayoría de los ensayos clínicos de las vacunas contra la COVID-19 se demostró que estas protegían de la enfermedad, también se obtuvieron indicios de que podrían evitar las infecciones. Una vacuna muy eficaz a la hora de impedir que los vacunados se infecten ayudaría de entrada a reducir la transmisión, afirma el vacunólogo Larry Corey, del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson, en Seattle (Washington).

Durante el ensayo de la vacuna de Moderna, fabricada en Boston, se tomaron muestras por hisopado a todos los participantes para ver si les quedaban restos de ARN vírico. En comparación con quienes recibieron un placebo, se observó una disminución de dos tercios en las infecciones asintomáticas entre los que se inyectaron la primera de las dos dosis de la vacuna. Pero como solo se comprobó dos veces en cada persona con un mes de diferencia, podrían haberse omitido algunas infecciones.

En el ensayo británico de la vacuna producida por la Universidad de Oxford y AstraZeneca, a los participantes se les realizaron frotis nasofaríngeos cada semana y se estimó que las infecciones asintomáticas disminuyeron un 49,3 por ciento en un subgrupo de vacunados con respecto al grupo sin vacunar.

Pfizer, con sede en Nueva York y fabricante de otra vacuna anticovídica puntera, ha comunicado que, para ver si sus inyecciones consiguen bloquear la infección, comenzará a realizar hisopados a los participantes cada dos semanas en los ensayos de la vacuna que se están llevando a cabo en los Estados Unidos y en Argentina.

¿Disminuirán los contagios?

Podría ocurrir que las vacunas ni impidan las infecciones ni las disminuyan significativamente. Pero, si una vez administradas, hacen que los infectados sean menos infectantes, ayudarían a reducir la transmisión.

Varios grupos de investigación en Israel están midiendo la «carga vírica» (la concentración de partículas del virus) de los vacunados que más adelante han dado positivo para el SARS-CoV-2. Se ha encontrado que la carga vírica es una buena indicación de la contagiosidad, según han demostrado en Cataluña Oriol Mitjà, del Instituto de Investigación Germans Trias i Pujol, y sus colaboradores.

En un trabajo preliminar con personas que habían recibido la primera dosis de la vacuna de Pfizer, se observó una caída importante de la carga vírica en un pequeño grupo de infectados con el SARS-CoV-2 al cabo de entre 2 y 4 semanas, en comparación con quienes se infectaron en las 2 primeras semanas. Para la modelizadora de enfermedades infecciosas Virginia Pitzer, de la Facultad de Salud Pública de Yale, en New Haven, «los datos son ciertamente interesantes y apuntan a que la vacunación reduciría la contagio-



LAS VACUNAS que bloqueen la transmisión del virus ayudarán a controlar la pandemia.

sidad de los casos de COVID-19, aunque no se impida del todo la infección». En el ensayo de Oxford-AstraZeneca también se observó que en un pequeño grupo de vacunados se reducía más la carga vírica que en el grupo sin vacunar.

Pero para otros investigadores no está claro todavía si esta caída de la carga vírica será suficiente para volvernos menos infectantes en la vida real.

Criterio de referencia

Para precisar si las vacunas detienen la transmisión, se están rastreando los contactos estrechos de los vacunados para ver si tienen una protección indirecta ante la infección.

Como parte del estudio PANTHER que se lleva a cabo en Inglaterra con cientos de sanitarios, los investigadores de la Universidad de Nottingham analizaron si los sanitarios y las personas que vivían con ellos presentaban ARN vírico y anticuerpos contra el SARS-CoV-2 entre abril y agosto de 2020 (en torno a la primera ola de la pandemia). Según nos explica Ana Valdes, epidemióloga genética de la Universidad de Nottingham, tras haber recibido la vacuna de Pfizer se volverá a analizar a algunos de los sanitarios y a sus contactos estrechos que no se hayan vacunado para ver si el riesgo de infección ha disminuido en estos últimos. Si disminuye, las vacunas probablemente estén bloqueando la transmisión.

En Israel también se planea estudiar los núcleos familiares en los que se ha vacunado un miembro. Si los vacunados se infectan, se podrá ver si contagian el virus a otro conviviente.

En un ensayo en la ciudad brasileña de Serrana y durante varios meses, se distribuirán por etapas y al azar las dosis de la vacuna contra la COVID-19 producida por Sinovac, una compañía farmacéutica con sede en Pequín. Esta estrategia demostrará si la caída de la COVID-19 en las regiones vacunadas también contribuye a reducir la transmisión en las zonas sin vacunar. Para la epidemióloga de enfermedades infecciosas Nicole Basta, de la Universidad McGill en Montreal, con esto se demostrarían los efectos indirectos de las vacunas. También añade que se necesitan estudios con más personas y poblaciones más grandes para observar el grado de protección que ofrecen las vacunas con respecto a la transmisión: «La verdad es que necesitamos resultados que abarquen todo el espectro».

Smriti Mallapaty *es periodista científica especializada en tecnología y agricultura y editora sénior de Nature Index*

Artículo original publicado en *Nature*, 19 de febrero de 2021. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Transmission of COVID-19 in 282 clusters in Catalonia, Spain: A cohort study. Michael Marks et al. en *The Lancet Infectious Diseases*, publicado en línea, 2 de febrero de 2021.

Decreased SARS-CoV-2 viral load following vaccination. Matan Levine-Tiefenbrun et al. en *MedrXiv*, 8 de febrero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Vacunas de ADN o ARN contra el nuevo coronavirus. Charles Schmidt en *IyC*, junio de 2020.

Ocho estrategias para obtener una vacuna contra el nuevo coronavirus. Ewen Callaway en *IyC*, junio de 2020.

¿Cómo nos protegerán las vacunas de las nuevas variantes de COVID-19? Ewen Callaway y Heidi Ledford en www.investigacionyciencia.es, 12 de febrero de 2021.

ASTROFÍSICA

Una nueva clase de estrellas desafía los modelos de nucleosíntesis estelar

El descubrimiento de estrellas muy ricas en fósforo podría ayudar a entender el enigmático origen de uno de los cinco elementos esenciales para la vida en la Tierra

DOMINGO ANÍBAL GARCÍA HERNÁNDEZ Y THOMAS MASSERON



NASA/ESA/EQUIPO PARA EL LEGADO DEL HUBBLE/INSTITUTO PARA LA CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL (STSCI)/AURA

HASTA HOY, la única prueba observacional de la síntesis estelar de fósforo procedía del remanente de la supernova Casiopea A (*imagen*). Sin embargo, los modelos de evolución química global de nuestra galaxia no podían dar cuenta de todo el fósforo observado en la Tierra y en la Vía Láctea recurriendo únicamente a las supernovas. Ahora, los astrónomos han encontrado una nueva fuente de este elemento, aunque aún ignoran cómo lo producen las nuevas estrellas.

Todo lo que nos rodea está hecho de átomos. Los diferentes tipos de átomos que existen en la naturaleza quedaron recogidos en la célebre tabla periódica de Mendeléiev, que en 2019 celebró su 150.º aniversario. Pero ¿cuál es el origen de los elementos químicos? ¿Cómo genera la naturaleza cada especie atómica?

En 2019 los científicos también celebramos otro aniversario menos famoso: el centésimo cumpleaños de la astrónoma Margaret Burbidge, quien tristemente falleció en abril del año pasado. En 1957, Margaret, su esposo Geoffrey y los astrofísicos William Fowler y Fred Hoyle abordaron la pregunta sobre el origen de los elementos químicos en un artículo que bien puede considerarse uno de los trabajos científicos más importantes de todos los tiempos. Conocido como «artículo B^2FH», en referencia a las iniciales de sus autores, en él establecieron que prácticamente todos los átomos que existen en la naturaleza (a excepción del hidrógeno y otros pocos átomos muy ligeros, creados poco después de la gran explosión) se sintetizaron en el interior de las estrellas mediante reacciones nucleares, un proceso conocido como nucleosíntesis estelar. Así pues, el origen de todo lo que vemos, incluidas nuestras propias células, se remonta al corazón de las estrellas.

Desde entonces, las siguientes generaciones de astrónomos han intentado descifrar qué tipo particular de estrella y qué cadena concreta de reacciones nucleares

da lugar a cada uno de los elementos de la tabla periódica. Sin embargo, y a pesar de todos los avances logrados durante las últimas décadas, aún persisten algunas incógnitas. Una de ellas atañe al origen de uno de los elementos esenciales para la vida en la Tierra: el fósforo.

Junto con el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el azufre, el fósforo es uno de los cinco elementos necesarios para la vida tal y como la conocemos. Desempeña un papel clave en el ADN y en los procesos de intercambio de energía en las células. No obstante, los astrónomos se han preguntado durante décadas sobre su origen estelar, ya que todos los modelos predicen menos fósforo del que observamos en la Vía Láctea. Ello sugiere que, hasta ahora, las posibles fuentes de este elemento se han subestimado o pasado por alto.

El año pasado, nuestro grupo de investigación del Instituto de Astrofísica de Canarias, en colaboración con expertos del Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CITIC) de La Coruña, dio un paso importante en esta dirección al identificar un nuevo tipo de estrellas muy ricas en fósforo. Estas estrellas no solo podrían contribuir a explicar la abundancia de este elemento esencial para la vida, sino que han planteado nuevas incógnitas, ya que su composición química desafía todos los modelos de nucleosíntesis estelar. En particular, apuntan a una fuente hasta ahora desconocida de elementos pesados, un hallazgo que podría tener importantes implicaciones para entender la evolución química de la galaxia.

El enigma del fósforo

En su trabajo de 1957, Burbidge y sus colaboradores distinguieron dos grandes familias de elementos químicos: aquellos cuyos átomos se crean en reacciones de fusión nuclear (la unión de dos núcleos) y aquellos originados cuando un núcleo captura un protón o un neutrón. Los procesos de fusión nuclear dan lugar al hierro y a los átomos más ligeros que este, mientras que las capturas protónicas o neutrónicas originan los elementos más pesados. Estos últimos incluyen algunos tan notables como el oro, la plata, el plomo o el plutonio. El fósforo y los demás elementos esenciales para la vida pertenecen a la primera clase.

Según los modelos de nucleosíntesis, las reacciones que dan lugar al fósforo se producen en dos entornos principales: bien en explosiones de supernova, o bien en gigantes rojas muy evolucionadas. Estas últimas, conocidas en lenguaje técnico como «estrellas de la rama asintótica de las gigantes», constituyen las etapas tardías de las estrellas similares al Sol, justo antes de formar nebulosas planetarias y morir como enanas blancas.

Hasta ahora, sin embargo, verificar con detalle esta hipótesis se había enfrentado a un problema: la ausencia de un instrumento astronómico capaz de detectar con eficiencia las débiles líneas espectrales del fósforo en el infrarrojo cercano; es decir, la «huella dactilar» de este elemento. Eso cambió hace poco gracias al Experimento de Evolución Galáctica del Observatorio de Apache Point (APOGEE), un sondeo masivo en el infrarrojo cercano de cientos de miles de estrellas de la Vía Láctea. Este proyecto es uno de los cuatro experimentos del Sondeo Digital del Cielo Sloan, la colaboración astronómica más productiva del mundo.

La cantidad de información proporcionada por estos estudios masivos es tal que, para extraerla, en los últimos años se han puesto en marcha varias colaboraciones interdisciplinares entre astrónomos y expertos en computación y ciencia de datos. En verano de 2019, durante uno de los cafés matutinos habituales en el Instituto de Astrofísica de Canarias, los autores de este artículo y otros investigadores nos preguntamos sobre la posibilidad de aplicar métodos de ciencia de datos a las grandes bases de datos espectroscópicas, como la del proyecto APOGEE. En concreto, buscábamos una aplicación para un código desarrollado por un estudiante de doctorado y sus supervisores en el CITIC, el cual había sido diseñado para explorar enormes bases de datos de espectros estelares. ¿Podía emplearse dicho código para indagar el origen estelar del fósforo?

Una nueva clase de estrellas

La pauta era simple: aplicar el algoritmo a los espectros de APOGEE y seleccionar aquellos que mostrasen fuertes líneas espectrales de fósforo. Al hacerlo, identificamos con éxito un grupo de 15 estrellas muy ricas en este elemento. Sin embargo, estas resultaron ser muy distintas de lo que esperábamos. Aparte de su elevada abundancia en fósforo, incluían cantidades sorprendentemente altas de otros elementos ligeros, como silicio, magnesio y aluminio: una composición que no guardaba ninguna relación con las predicciones teóricas relativas a las gigantes rojas o las explosiones de supernova.

De hecho, las proporciones observadas de elementos ligeros no se correspondían con las predicciones de ningún modelo de nucleosíntesis estelar. Nuestros resultados, publicados en agosto en la revista *Nature Communications*, indicaban que estas estrellas no habían creado el fósforo por sí mismas. Pero tampoco formaban parte de sistemas binarios, por lo que no pudieron haberlo adquirido a partir de una gigante roja compañera. Todo apuntaba a que habían nacido en un entorno ya enriquecido con fósforo, debido posiblemente a la «contaminación» de estrellas muy masivas. ¿Podíamos caracterizar a estas estrellas progenitoras?

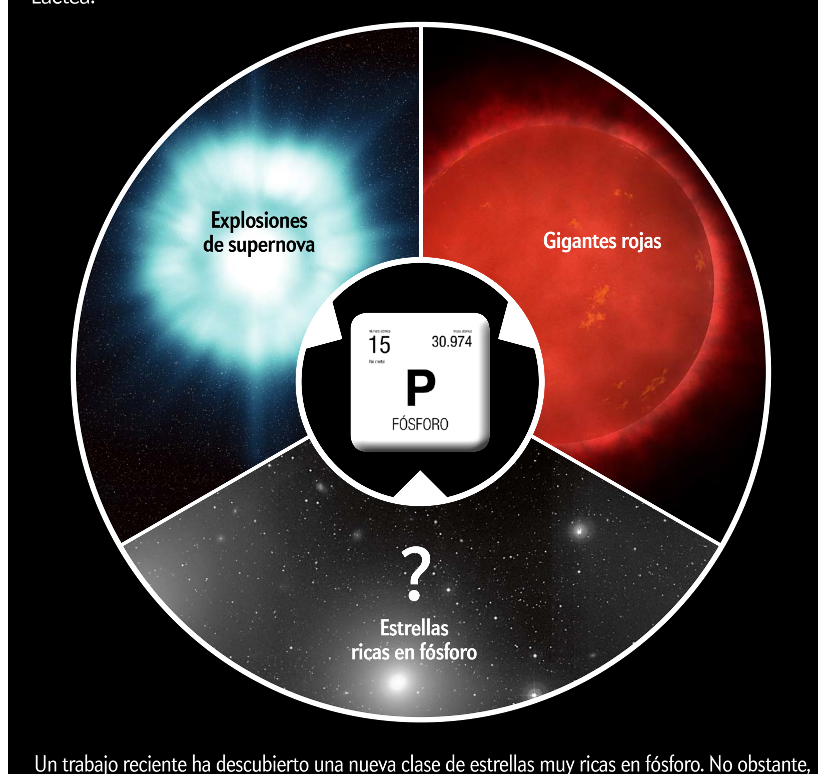
Para obtener más pistas, decidimos estudiar el patrón de elementos pesados en las estrellas ricas en fósforo; en particular, el de aquellos generados por captura de neutrones. Esto nos trae de vuelta al artículo fundacional de Burbidge y sus colaboradores. En él, los autores habían establecido dos mecanismos de captura de neutrones según la velocidad del neutrón: el «proceso *r*» (del inglés *rapid*) y el «proceso *s*» (de *slow*). En general, el primero se ha asociado a explosiones de supernova, mientras que el segundo se considera ligado a las gigantes rojas evolucionadas.

Los espectros del proyecto APOGEE correspondían al infrarrojo cercano. No obstante, analizar la abundancia de elementos pesados exige disponer de espectros ópticos. En aquel momento solo contábamos con un espectro óptico de una de las estrellas ricas en fósforo. Y aunque los datos no eran de la calidad deseada, ello bastó para obtener información sobre algunos elementos pesados, como rubidio, estroncio, bario, lantano o europio. Estos podrían revelar qué tipo de proceso (*s* o *r*) era el responsable de la formación de los elementos pesados y, de esta manera, elucidar los progenitores de las enigmáticas estrellas ricas en fósforo.

Sin embargo, tras una comparación exhaustiva con modelos teóricos muy diversos, el patrón químico observado seguía sin parecerse al predicho por ninguno de ellos. En particular, era muy llamativo el elevado contenido de bario, un «elemento *s*», así como la baja cantidad de europio, cuya formación está dominada por el proceso *r*. Pero la limitada calidad de aquel espectro no nos permitió analizar la abundancia de otros elementos

EL MISTERIO DEL FÓSFORO

EL ORIGEN ESTELAR DEL FÓSFORO, un elemento esencial para la vida, carece todavía de explicación. Según todos los modelos, este elemento debería sintetizarse en dos entornos principales: gigantes rojas y explosiones de supernova. Sin embargo, las cantidades de fósforo predichas por estos procesos son inferiores a las observadas en la Vía Láctea.



Un trabajo reciente ha descubierto una nueva clase de estrellas muy ricas en fósforo. No obstante, su composición química no se corresponde con las predicciones de ningún modelo de nucleosíntesis estelar. Además de su alto contenido en fósforo, presentan abundancias sorprendentemente elevadas de otros elementos ligeros, como el silicio, el magnesio y el aluminio. Al mismo tiempo, apuntan a la existencia de una fuente hasta ahora desconocida de elementos químicos pesados, como el bario.

pesados; en particular la de plomo, un elemento muy interesante para discernir entre los procesos *s* y *r*, o incluso para esclarecer la existencia de un mecanismo intermedio conocido como «proceso *i*».

Una nueva fuente de elementos pesados

Llegados aquí, nos propusimos obtener espectros ópticos de otras estrellas ricas en fósforo. Aquella no fue una tarea sencilla, puesto que estas estrellas son por lo general muy débiles en la zona visible del espectro electromagnético, y solo una de ellas mostraba un brillo lo suficientemente intenso. Con todo, su observación con el Telescopio Óptico Nórdico (un instrumento de 2,5 metros de diámetro ubicado en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, en La Palma) nos permitió obtener un espectro de gran calidad. Este no solo confirmó las peculiares abundancias de elementos pesados que ya habíamos advertido anteriormente, sino que nos proporcionó información sobre otros elementos químicos.

Para caracterizar dicho espectro, comparamos las abundancias de elementos pesados con las observadas en tres tipos de estrellas (CH, EMP y CEMP) consideradas, respectivamente, como los estándares de los procesos *s*, *r* e *i*. Dicha comparación presentaba la ventaja de ser independiente de todos los posibles parámetros e incertidumbres inherentes a los modelos teóricos de nucleosíntesis estelar. Ello nos permitió concluir que las nuevas estrellas ricas en fósforo presentaban una sobreabundancia de elementos pesados de tipo *s*. Los resultados se publicaron a finales de 2020 en *The Astrophysical Journal Letters*.

El proceso *s* asociado a las nuevas estrellas ricas en fósforo ha resultado ser distinto del que ocurre en las gigantes rojas evolucionadas; durante décadas, el único entorno estelar conocido donde tiene lugar la captura de neutrones lentos. Las diferencias más notables son una mayor proporción de bario frente a lantano (situado justo al lado en la tabla periódica) y un contenido de europio y plomo menor de lo esperado. Dado que, además, las abundancias de fósforo y otros elementos ligeros descartan que las gigantes rojas puedan ser las progenitoras de las estrellas ricas en fósforo, podemos concluir que estas últimas —sean cuales sean— constituyen un nuevo entorno estelar para la formación de elementos pesados.

Estos resultados desafían la teoría de formación de elementos químicos en el interior de las estrellas y podrían tener importantes implicaciones para entender la evolución química de la Vía Láctea. El hallazgo guiará los esfuerzos teóricos y observacionales para explicar las progenitoras de estas desconcertantes estrellas ricas en fósforo, al tiempo que podría constituir una pista clave para entender el origen de este elemento esencial para la vida en la Tierra. Dependiendo de la frecuencia con que ocurra la peculiar nucleosíntesis asociada a estas estrellas, el fenómeno podría explicar el fósforo presente en nuestro planeta y arrojar luz sobre la habitabilidad de otras partes de la galaxia.

Domingo Aníbal García Hernández* y *Thomas Masseron
son investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias.

PARA SABER MÁS

Phosphorus-rich stars with unusual abundances are challenging theoretical predictions. Thomas Masseron et al. en *Nature Communications*, vol. 11, art. 3759, agosto de 2020.

Heavy-element abundances in P-rich stars: A new site for the *s*-process? Thomas Masseron et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 904, art. L1, noviembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Estrellas masivas. Artemio Herrero en *IyC*, marzo de 2008.

La tabla periódica de las estrellas. Ken Croswell en *IyC*, septiembre de 2011.

Supernovas extremas. Anna Y. Q. Ho en *IyC*, febrero de 2021.

NASA/WALT FEIMER (*gigante roja*); ESA (*explosión supernova*); NASA/JPL-CALTECH/TEXAS A&M (*estrellas*)

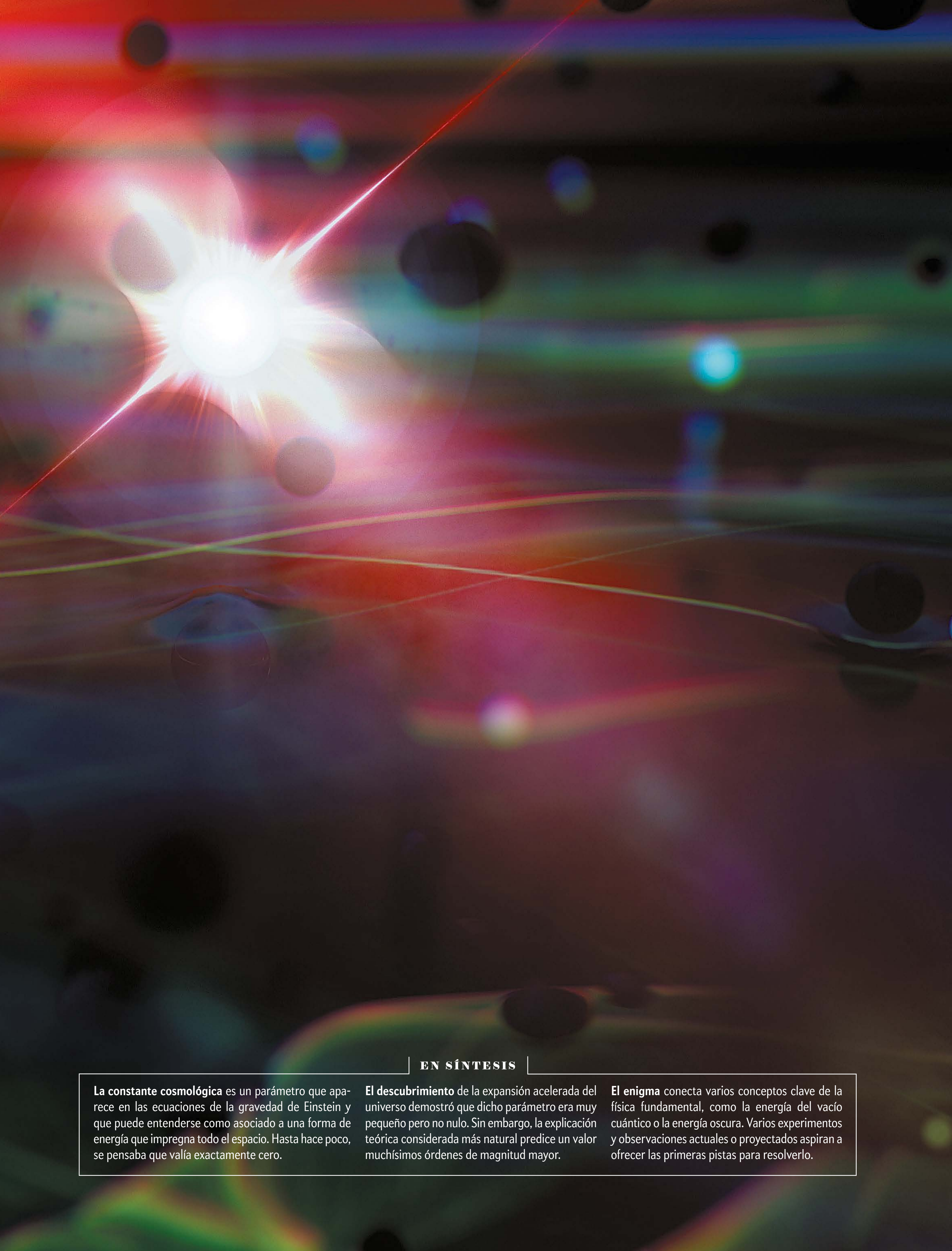
FÍSICA FUNDAMENTAL

EL PROBLEMA DE LA CONSTANTE COSMOLÓGICA

El ínfimo valor de este parámetro fundamental de la naturaleza constituye uno de los mayores enigmas de la física contemporánea. ¿Qué dice la investigación actual?

Clara Moskowitz

Ilustración de Mark Ross



EN SÍNTESIS

La constante cosmológica es un parámetro que aparece en las ecuaciones de la gravedad de Einstein y que puede entenderse como asociado a una forma de energía que impregna todo el espacio. Hasta hace poco, se pensaba que valía exactamente cero.

El descubrimiento de la expansión acelerada del universo demostró que dicho parámetro era muy pequeño pero no nulo. Sin embargo, la explicación teórica considerada más natural predice un valor muchísimos órdenes de magnitud mayor.

El enigma conecta varios conceptos clave de la física fundamental, como la energía del vacío cuántico o la energía oscura. Varios experimentos y observaciones actuales o proyectados aspiran a ofrecer las primeras pistas para resolverlo.

Clara Moskowitz es redactora sénior de *Scientific American* especializada en física y ciencias del espacio.



Incluso donde parece que no debería haber nada, hay algo.

Si, después de haber eliminado todos los planetas, las estrellas y las galaxias, examináramos con un potente microscopio el espacio vacío, es posible que esperásemos ver la nada más absoluta. Sin embargo, esta conclusión sería errónea. En su lugar, descubriríamos una escena dinámica, rebosante de partículas que cobran vida por un instante y desaparecen de inmediato.

La mecánica cuántica, la teoría que gobierna el mundo microscópico, no permite la nada. No hay ningún punto del espacio o el tiempo donde la energía pueda valer exactamente cero. La naturaleza siempre se reserva un pequeño «margen de maniobra». Y de él pueden surgir partículas virtuales: pares formados por una partícula y su antipartícula que, tan pronto como aparecen, se aniquilan y se esfuman de nuevo. Todo esto podrá sonar extraño, pero hace tiempo que los efectos de las partículas virtuales se observan en los experimentos. Por ejemplo, cuando los aceleradores de partículas midieron la masa del bosón *Z*, esta difería ligeramente del que debía ser su valor «puro». Ello se debe a que un bosón *Z* puede convertirse brevemente en una pareja de quarks *top* virtuales, lo que modifica su masa. Este fenómeno no es sino uno de los muchos que demuestran la existencia de las partículas virtuales.

Todas esas partículas que aparecen y desaparecen dan lugar a una «energía del vacío» que inunda el cosmos y que empuja hacia afuera el propio espacio. Al menos, esa es la explicación considerada más probable de la energía oscura, el misterioso agente responsable de la expansión acelerada del universo.

El problema de la energía del vacío es que no parece haber suficiente. Cuando los físicos comenzaron a hacer cálculos, hallaron que su valor debía ser enorme: tanto que habría expandido el cosmos tan deprisa que las estrellas y las galaxias no habrían tenido tiempo de formarse. Obviamente eso no ha ocurrido, por lo que la energía del vacío ha de ser mucho menor. En concreto, unos 120 órdenes de magnitud menor de lo que predice la teoría cuántica. Eso equivale a decir que algo que debería pesar 5 kilos pesa en realidad 0,00...005, con 120 ceros antes del 5. Semejante discrepancia ha llevado a algunos científicos a calificar dicho cálculo como «la peor predicción teórica de la historia de la física».

Los investigadores también creen que la energía del vacío es el principal ingrediente de la constante cosmológica, un término presente en las ecuaciones de la relatividad general. El enorme desacuerdo entre el valor predicho y el observado se conoce también como «problema de la constante cosmológica». «En general, está considerado uno de los problemas más incómodos, embarazosos y complejos de la física teórica actual», señala Antonio Padilla, físico de la Universidad de Nottingham que ha dedicado 15 años a estudiarlo. «Indica que a nuestro relato le falta algo. Me parece emocionante, ¿quién no querría trabajar en algo así?»

El enigma ha seducido a algunas de las mentes más brillantes de la física y ha suscitado todo tipo de ideas para resolverlo. El año pasado, en una charla en la Universidad Brown, el físico de la Universidad de Nueva York Gregory Gabadadze se pasó casi una hora resumiendo todas las ideas que se han propuesto hasta ahora para solucionarlo. Al final, le preguntaron cuál de ellas prefería. «Ninguna», respondió. Según él, todas son demasiado «radicales» y exigen «renunciar a principios sagrados».

Por su parte, otros físicos consideran que algunos trabajos teóricos recientes están insuflando emoción al dilema. Y los avances en varios experimentos de laboratorio dedicados a estudiar la gravedad, así como la llegada de la astronomía de ondas gravitacionales, han comenzado a ofrecer la esperanza de poner a prueba algunas de las hipótesis propuestas hasta ahora, aunque solo sea para descartarlas.

EL NACIMIENTO DE UN PROBLEMA

La constante cosmológica tiene una historia accidentada. «Fue lo que podríamos llamar una no solución a un no problema», afirma Rafael Sorkin, investigador del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario. Albert Einstein la introdujo en 1917 como un parche matemático para lograr que sus ecuaciones de la relatividad general describieran un universo estático, en consonancia con la visión del cosmos que por entonces tenían él y la mayoría de los científicos. Pero, en 1929, Edwin Hubble observó que las galaxias se alejan de nosotros y que, cuanto más distantes se hallan, mayor es la velocidad con que se separan. Aquello demostró que el espacio se expande y que, miremos donde miremos, siempre nos parecerá que las galaxias se apartan unas de otras, ya que todas las distancias crecen sin cesar. Como consecuencia, un par de años después, Einstein decidió eliminar de sus ecuaciones la constante cosmológica, la cual acabaría calificando como «la mayor metedura de pata» de toda su carrera, según el físico George Gamow.

Durante un tiempo, la constante cosmológica quedó relegada a una curiosidad histórica. Pero, con sigilo, estaba preparando su regreso. En los años noventa, dos equipos de astrónomos se propusieron medir cuánto se ralentizaba la expansión del universo como consecuencia de la atracción gravitatoria entre la materia. En 1998 y 1999 publicaron sus resultados, basados en las mediciones de cierto tipo de supernovas cuyas distancias pueden determinarse con gran precisión. Las supernovas más distantes resultaron ser mucho más tenues (y, por tanto, más lejanas) de lo esperado. De modo que la expansión cósmica no se estaba frenando, sino acelerando. Aquel desconcertante hallazgo acabaría granjeándoles un Nobel a tres de los líderes de esos equipos, y llevó al cosmólogo Michael Turner a acuñar el término «energía oscura» para referirse a la misteriosa componente que causaba la aceleración. Los físicos enseguida sugirieron que la fuente de la energía oscura podía ser la constante cosmológica; es decir,

la energía del vacío. «Tal vez hubo más clarividencia en la metedura de pata de Einstein que en los mejores intentos posteriores del común de los mortales», escribiría más tarde Saul Perlmutter, uno de los descubridores de la aceleración cósmica.

Una vez más, la constante cosmológica permitió ajustar las ecuaciones de Einstein, esta vez para que describieran un universo en expansión acelerada. Pero su valor carecía de sentido. De hecho, agravó un problema que llevaba tiempo importunando a los físicos. En los años en que la constante cosmológica había estado guardada en un cajón, los investigadores habían relacionado ese término de la relatividad general con el concepto de energía del vacío de la mecánica cuántica. Sin embargo, se suponía que la energía del vacío era enorme.

Uno de los primeros en darse cuenta de que algo fallaba fue Wolfgang Pauli. En los años veinte, el físico austríaco dedujo que dicha energía debía ser tan grande que el cosmos tendría que haberse expandido hasta el punto de que la luz ya no podría llegar de un cuerpo celeste a otro. Todo el universo observable, calculó Pauli, «no llegaría ni a la Luna». Parece que a Pauli le hizo gracia su resultado, y nadie por entonces se lo tomó en serio. El primero que calculó con detalle el valor de la constante cosmológica a partir de las predicciones cuánticas para la energía del vacío fue Yákov Zeldóvich, quien en 1967 halló que dicha energía debería dar lugar a una constante cosmológica gigantesca. En aquella época, los científicos pensaban que el universo se expandía a una velocidad constante o cada vez menor, y la mayoría de ellos creía que la constante cosmológica valía exactamente cero. Había nacido el problema de la constante cosmológica.

Treinta años más tarde, cuando los astrónomos descubrieron que la expansión del cosmos se estaba acelerando, el problema no se resolvió. La aceleración, aunque inesperada, seguía siendo minúscula en comparación con el valor predicho por la teoría cuántica. Y, en cierto modo, la necesidad de restablecer la constante cosmológica empeoró las cosas: explicar un número tan pequeño era aún más difícil que imaginar un mecanismo que lo anulase por completo. «Su valor es muy extraño», sostiene Katherine Freese, física teórica de la Universidad de Texas en Austin. «Más extraño aún que si fuera cero.»

No todo el mundo está de acuerdo en que eso suponga un problema. Técnicamente, la constante cosmológica no es más que una constante de la naturaleza: un número que aparece en una ecuación y que puede tomar cualquier valor, opina Sabine Hossenfelder, física teórica del Instituto de Estudios Avanzados de Fráncfort. Que tenga el valor que tiene no es más que una coincidencia numérica. «Podríamos aceptar la constante y olvidarnos del asunto», afirma Hossenfelder. «La cuestión de por qué toma precisamente ese valor no constituye una pregunta científicamente válida.» Ningún aspecto de la teoría cuántica de campos se vio falsado cuando se comprobó que su predicción no concordaba con las observaciones astronómicas, argumenta la experta, y dicha teoría sigue siendo hoy tan útil como lo fue siempre. «Creo que la mayoría de los cosmólogos y los astrofísicos piensan que hay un problema porque es lo que siempre les han dicho», critica.

Con todo, son muchos los físicos que no pueden pasarlo por alto. Ven en la inesperada pequeñez de la constante cosmológica un hilo del que hay que tirar. «Me incomoda muchísimo», confiesa Gabadadze, «y me gustaría tener una respuesta».

ABANICO DE PROPUESTAS

A pesar del entusiasmo con que muchos investigadores abordan la cuestión, los avances han llegado con cuentagotas. «Han pasado más de 50 años desde que Zeldóvich identificara el problema y está claro que no tenemos una explicación consolidada y aceptada», lamenta Padilla. «Las ideas van y vienen, pero casi ninguna perdura.»

La mayoría de las propuestas pueden agruparse en tres categorías: cambiar las ecuaciones de la relatividad general que describen la expansión del universo, modificar las ecuaciones de la teoría cuántica de campos que predicen el valor de la energía del vacío, o postular algo completamente nuevo.

Retocar la relatividad general podría cambiar el papel matemático de la constante cosmológica o incluso desterrarla. Freese y sus colaboradores, por ejemplo, han intentado eliminar la necesidad de recurrir a esta constante para explicar la aceleración del universo alterando la manera de aplicar la relatividad general al cosmos en expansión. «La materia y los fotones podrían bastar, sin añadir ningún componente nuevo al universo, si su papel en las ecuaciones fuera distinto», explica la investigadora. Su modelo se basa en la idea de que podría haber dimensiones adicionales ocultas más allá de las cuatro (tres espaciales y una temporal) que experimentamos en nuestro día a día.

Otro enfoque que busca actualizar la relatividad general es el llamado «secuestro» de la energía del vacío, propuesto por Padilla y sus colaboradores. Este consiste en modificar la teoría de Einstein de tal modo que la gravedad quede «blindada» y no pueda sentir los efectos de la energía del vacío. «No puedo decir que sea el modelo establecido», reconoce Padilla, «pero nadie ha sido capaz de refutarlo».

Si la relatividad general no es el problema, tal vez lo sea la teoría cuántica. Algunos han sugerido que las técnicas empleadas en teoría cuántica de campos para calcular la energía del vacío no son las correctas. Stefan Hollands, ahora en la Universidad de Leipzig, y Robert Wald, de la de Illinois, han señalado que los métodos ordinarios se diseñaron pensando en un espaciotiempo plano. Pero, si pudieran modificarse de la manera adecuada para aplicarlos a un espaciotiempo curvo, el problema de la constante cosmológica desaparecería.

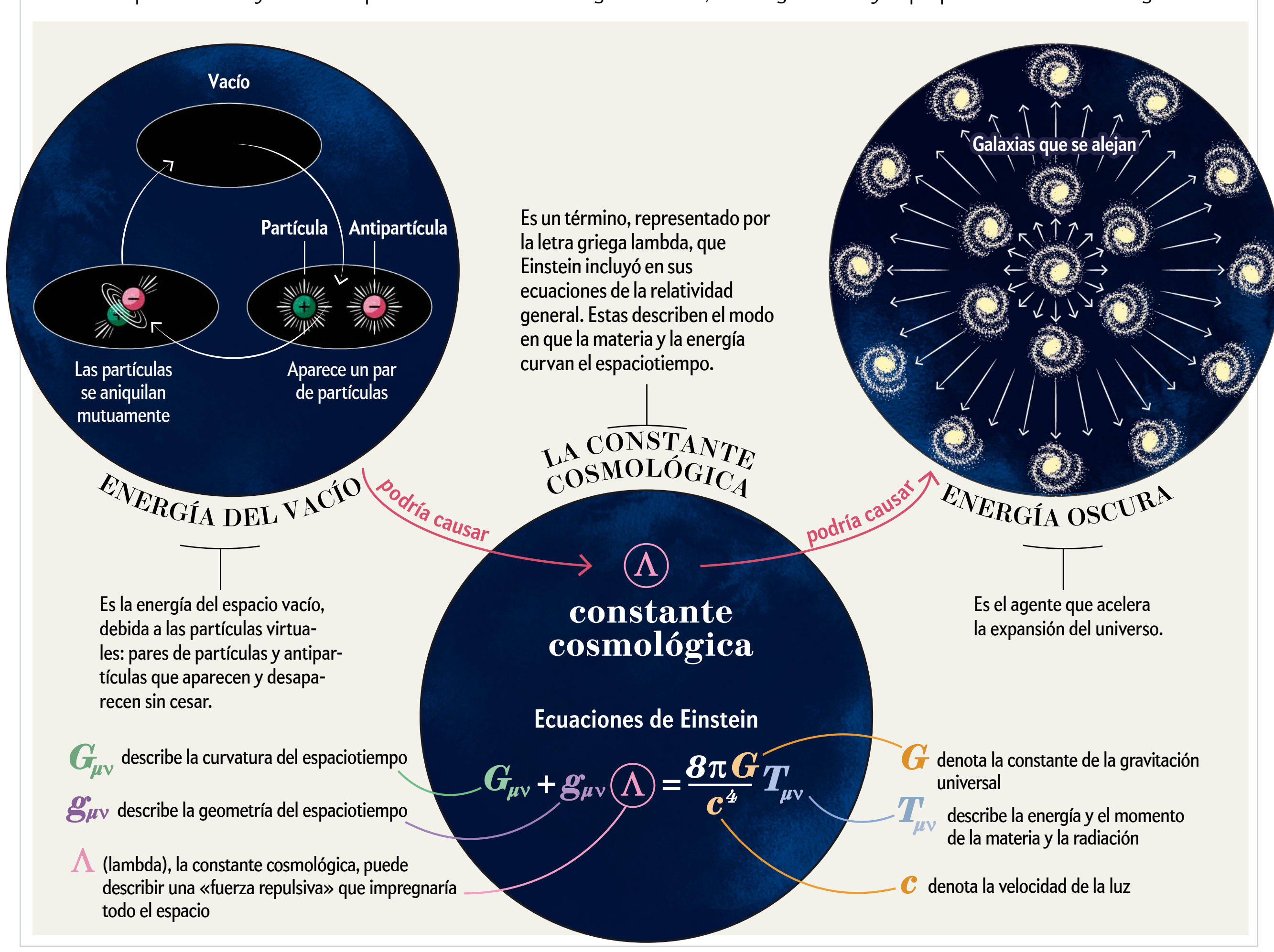
Pero la solución podría requerir algo más que ajustes matemáticos en las ecuaciones tradicionales. Una idea poco ortodoxa es la propuesta por Steve Carlip, de la Universidad de California en Davis, para quien el espaciotiempo podría quedar descrito a un nivel fundamental por una especie de «espuma». Según este modelo, la curvatura del espacio fluctuaría sin cesar a escalas diminutas, mucho menores que nada de lo que podamos medir. A la postre, toda esa complicada topología anularía buena parte del efecto de la constante cosmológica, la cual tomaría un valor diminuto a escalas observables. «La idea es un tanto extravagante», admite Carlip. «Se trata de una propuesta desesperada. Pero también lo son los demás intentos de lidiar con la constante cosmológica, y vivimos tiempos desesperados.»

Sorkin, para quien la espuma espaciotemporal de Carlip «va en la dirección correcta», también cuenta con su propia propuesta. Trabaja en una idea para unificar la mecánica cuántica y la gravedad denominada «teoría de conjuntos causales». Según esta, el espaciotiempo es fundamentalmente discreto. Eso significa que, en vez de ser una extensión suave y continua, se divide en pequeños trozos, unidades de espacio y de tiempo que representarían los componentes básicos del universo, de manera similar a como los átomos constituyen las piezas esenciales de la materia. En tal caso, calcular la constante cosmológica implicaría dividirla entre el número de unidades de espaciotiempo del universo, lo que a la postre arrojaría un valor mucho más cercano al que observan los astrónomos.

DEL VACÍO CUÁNTICO A LA EXPANSIÓN CÓSMICA

Las tres piezas del rompecabezas

El problema de la constante cosmológica es considerado uno de los mayores misterios de la física: el valor medido de dicha constante, presente en las ecuaciones de la relatividad general de Einstein, es muchísimo menor de lo que predice la teoría. En este rompecabezas hay tres conceptos relacionados: la energía del vacío, la energía oscura y la propia constante cosmológica.



FEDERICA FRAGAPANE

Una de las soluciones más conocidas —y controvertidas— al problema de la constante cosmológica viene dada por el principio antrópico. Este reconoce que la constante cosmológica adopta un valor muy improbable, pero lo explica postulando que vivimos en un multiverso. Si nuestro universo no es más que una burbuja inmersa en un océano cósmico, cada una de las cuales exhibe diferentes leyes y constantes físicas, entonces por fuerza tendrá que existir una como la que observamos. La mayoría de esas burbujas no darían lugar a un universo con galaxias, estrellas, planetas o vida, por lo que no es de extrañar que hayamos venido a parar a una con valores atípicos. Dado que la teoría de cuerdas da cabida natural a un multiverso, quienes trabajan en este campo tienden a considerar que el razonamiento antrópico básicamente soluciona el problema. Sin embargo, otros físicos piensan que eso no es más que escurrir el bulto. «Equivale a renunciar a resolver el problema», opina Sorkin.

Todas estas estrategias implican revisiones drásticas de la física establecida. «Todas requieren una importante remodelación de los principios básicos, ya sea en lo relativo al espaciotiempo, al número de dimensiones del universo, etcétera», señala Gabadadze. «Todas tienen algún aspecto poco atractivo.» Y hasta ahora, ninguna se ha impuesto claramente a las demás. «Por el momento, es cuestión de gustos», admite Carlip. «Probablemente la respuesta sea algo en lo que aún no ha pensado nadie.»

¿CONSTANTE COSMOLÓGICA O QUINTAESENCIA?

La constante cosmológica sigue constituyendo la mejor explicación para la energía oscura, el misterioso agente que acelera la expansión del espacio. Pero ¿y si la energía oscura no guardase ninguna relación con la constante cosmológica ni con la energía del vacío? ¿Qué ocurriría si la energía del vacío se anulara de algún modo y la constante cosmológica valiese exactamente cero? En tal caso, la energía oscura podría deberse a algo conocido como «quintaesencia».

La idea fue propuesta en 1998 por los físicos Robert Caldwell, Paul Steinhardt y Rahul Dave como una explicación alternativa a la expansión acelerada del universo. La quintaesencia constituiría una forma de energía con presión negativa que

impregnaría el espacio y que, al contrario que la constante cosmológica, podría variar con el tiempo. Una versión de la quintaesencia, denominada «energía fantasma», postula una energía cuya densidad aumenta con la edad del universo, lo cual acaba conduciendo a un «gran desgarro» en el que una expansión desbocada desgaja el cosmos hasta que la distancia entre partículas se vuelve infinita.

Para comprobar si la energía oscura se debe a la quintaesencia o a la constante cosmológica, los físicos han de determinar si su densidad ha cambiado con el tiempo. Varias colaboraciones han reunido datos sobre el ritmo de expansión del espacio en diferentes épocas cósmicas. Una de ellas es el Sondeo de la Energía Oscura, un proyecto de seis años que ha usado el telescopio Víctor M. Blanco, en Chile, para estudiar galaxias situadas a diversas distancias en una gran región del cielo. Los datos ya están disponibles y, aunque los científicos aún los están analizando, de momento apuntan a que la energía oscura sería constante. La quintaesencia también podría causar que las constantes fundamentales de la naturaleza cambiasen con el tiempo, pero hasta ahora nadie ha hallado indicios sólidos de que eso ocurra.

Durante los próximos dos decenios, varios experimentos deberían proporcionar una idea más clara de si la constante cosmológica (y la energía del vacío asociada a ella) es la fuente de la energía oscura. El Sondeo Patrimonial del Espacio y el Tiempo (LSST) del Observatorio Vera C. Rubin, que debería comenzar a tomar datos en 2022 con un telescopio que actualmente se está construyendo en Chile, mejorará drásticamente la precisión de las mediciones relativas a la historia de la expansión cósmica. En breve, los físicos deberían estar en condiciones de afirmar con mucha más rotundidad si los datos resultan compatibles con la quintaesencia o con una componente inmutable.

EN BUSCA DE PISTAS EXPERIMENTALES

Si, como parecen indicar las pruebas disponibles, la energía oscura es el resultado de la constante cosmológica, aún hay esperanzas de poner orden en las diversas propuestas que tratan de explicar su sorprendente pequeñez. Los próximos experimentos y observaciones astronómicas podrían servir para discriminar entre la profusión de teorías.

Hace cinco años, los científicos adquirieron una herramienta completamente nueva para estudiar el cosmos cuando comenzaron a detectar ondas gravitacionales, las ondulaciones del espaciotiempo generadas en las colisiones entre astros muy masivos, como agujeros negros o estrellas de neutrones. Experimentos como el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en Estados Unidos, y Virgo, en Italia, detectan las ondas producidas en esos cataclismos cósmicos. Algunas propuestas para resolver el problema de la constante cosmológica se basan en modificaciones de la relatividad general que harían que la gravedad viajara a una velocidad ligeramente menor que la de la luz. El hecho de que las ondas gravitacionales y la luz generadas en un mismo cataclismo cósmico parezcan llegar a la vez a la Tierra ha invalidado esta idea, lo que ha permitido descartar unas cuantas teorías. «Hace diez años teníamos un modelo apodado The Fab Four que trataba de solucionar el problema de la constante cosmológica», señala Padilla. «Yo ya empezaba a tener mis reservas, pero los datos de ondas gravitacionales acabaron por descartarlo.»

Las ondas gravitacionales podrían revelar una actividad extraña en las estrellas de neutrones, los objetos ultradensos que quedan tras algunas explosiones de supernova. En ellas, los protones y los electrones se han combinado para dar lugar a un astro compuesto casi en exclusiva por neutrones. Sus extrañas propiedades podrían generar una fase de la materia hasta ahora desconocida y que causaría un cambio en la energía del vacío allí contenida. Los observatorios de ondas gravitacionales podrían ser sensibles a los efectos de esa energía adicional, en cuyo caso cabría obtener pistas sobre la energía del vacío.

Y mientras los astrofísicos buscan pistas a escalas cósmicas, otros experimentos de proporciones mucho más modestas podrían también contribuir a poner a prueba algunas hipótesis. Un ejemplo es el trabajo del grupo Eöt-Wash, de la Universidad de Washington, que efectúa medidas de precisión de la gravedad con un péndulo de torsión: un disco de metal donde se han practicado orificios pende de un fino cable y, justo debajo, a una distancia equiparable al grosor de una hoja de papel, hay otro disco similar que rota a velocidad constante. A medida que este último gira, la atracción gravitatoria que ejerce causa que el disco superior se mueva de un lado a otro.

Este experimento, muy sensible, permite estudiar el comportamiento de la gravedad a escalas de hasta decenas de micrómetros. Si a esas distancias la fuerza gravitatoria se debilita, como predicen algunas teorías, o si se hacen aparentes los efectos de una hipotética dimensión adicional del espacio, el grupo Eöt-Wash debería poder detectarlo. En los trabajos efectuados hasta ahora, la gravedad ha seguido al pie de la letra las leyes de Newton y Einstein, pero los investigadores siguen ajustando el instrumento para explorar separaciones cada vez más pequeñas. Con todo, es posible que tales efectos gravitatorios se manifiesten solo a distancias tan cortas que queden fuera del alcance de estos experimentos.

«Seguiremos intentándolo», asegura Gabadadze con respecto a los experimentos que intentan poner a prueba las distintas teorías sobre la constante cosmológica. «Más o menos desde 1960, cada generación de físicos ha visto cómo aparecían nuevas propuestas. Quizá llegue el día en que algunas de ellas hagan predicciones que podamos verificar, pero aún no estamos en ese punto.» Pese a la complejidad del rompecabezas, él y otros físicos albergan la esperanza de hallar pronto una solución. Tal vez los intentos por resolver el problema de la constante cosmológica revelen verdades más profundas sobre la física cuántica y la relatividad general. O quizá los científicos descubran una explicación más sencilla. Y aunque puede que la solución nunca se materialice, muchos físicos disfrutan con la búsqueda. IyC

PARA SABER MÁS

Quantum field theory is not merely quantum mechanics applied to low energy effective degrees of freedom. Stefan Hollands y Robert M. Wald en *General Relativity and Gravitation*, vol. 36, págs. 2595–2603, diciembre de 2004.

Sequestering the Standard Model vacuum energy. Nemanja Kaloper y Antonio Padilla en *Physical Review Letters*, vol. 112, art. 091304, marzo de 2014.

New test of the gravitational $1/r^2$ law at separations down to 52 μm. John G. Lee et al. en *Physical Review Letters*, vol. 124, art. 101101, marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El Sondeo de la Energía Oscura. Joshua Frieman en *IyC*, enero de 2016.

El rompecabezas de la energía oscura. Adam G. Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.

Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica. Miguel Zumalacárregui Pérez en *IyC*, junio de 2018.

El mayor mapa tridimensional del universo. Andreu Font-Ribera, Héctor Gil-Marín y Santiago Ávila en *IyC*, enero de 2021.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

El siniestro ataque de la avispa esmeralda

Este insecto parasitoide es la peor pesadilla de la cucaracha, de la que se adueña para criar a su descendencia

Kenneth C. Catania





Kenneth C. Catania es profesor de ciencias biológicas en la Universidad Vanderbilt, en Tennessee. Estudia neurobiología comparada, con énfasis en los sistemas sensoriales de los animales. Su último libro se titula *Great adaptations* (Princeton University Press, 2020).





ÚN NO HABÉIS ENTENDIDO A QUÉ OS ESTÁIS ENFRENTANDO. Es el organismo perfecto. Solo su hostilidad iguala su perfección anatómica. Admiro su pureza. Es un superviviente al que no le refrenan la conciencia, los remordimientos ni las ilusiones de moralidad.» Así describe el androide Ash al monstruo extraterrestre concebido por el director de cine Ridley Scott, en una célebre escena de su gran éxito *Alien: el octavo pasajero,* de 1979. La película causó pesadillas a toda una generación de aficionados a la ciencia ficción, con el relato de una criatura alienígena que se aferra al rostro de los tripulantes de la astronave Nostromo y les implanta un embrión que tiempo más tarde emerge violentamente del pecho de la víctima. Desde el punto de vista científico, el alienígena es un parasitoide, un organismo que, a diferencia de la mayoría de los parásitos, acaba matando a su hospedador. Nadie que haya visto la película olvida, por mucho que quiera, el modo en que se multiplica.

Hace poco no he podido sino compartir algunas de las opiniones de Ash sobre los parasitoides que brotan del pecho. Pero no me juzguen mal. No me refiero a ningún monstruo horripilante venido del espacio exterior, sino a lo más parecido que tenemos aquí, en la Tierra: la avispa esmeralda *Ampulex compressa*, un himenóptero parasitoide que se adueña de la voluntad de la cucaracha americana.

Me presentaré: soy neurobiólogo y cada otoño imparto un curso sobre el cerebro y el comportamiento animal en la Universidad Vanderbilt, en Tennessee. En el día de difuntos me gusta compartir con mis alumnos una pequeña nota siniestra de biología —es una forma memorable de aprender conceptos básicos de neurociencia—. Cuando empecé a hablar en mis clases de la avispa esmeralda, quedé tan cautivado por ella que hice traer algunos individuos a mi laboratorio para observar su comportamiento con mis propios ojos. Comencé con algo sencillo, como tomar fotografías y rodar algunas filmaciones para mis clases, pero no tardé en emprender una investigación en toda regla sobre este sorprendente insecto. Ya era sabido que la avispa es un parasitoide, pero gracias a los experimentos que he llevado a cabo en los últimos años he averiguado que es aún más notable de lo que se creía. Y la cucaracha también hace alarde de ingenio.

TOMAR EL CONTROL

Antes de los descubrimientos que despertaron mi admiración por este himenóptero, les explicaré cómo llamó la atención de los científicos por primera vez. La hembra de la avispa esmeralda tiene una sola misión: hallar un anfitrión que sirva de alimento para sus larvas. Como tantos otros tipos de parasitoides, es una

EN SÍNTESIS

La avispa esmeralda es un parasitoide que depreda a la cucaracha americana para suministrar alimento vivo a sus larvas. Con ese fin inyecta un veneno nervioso que la domeña y le permite sepultarla en vida, junto a un huevo suyo.

Nuevos estudios han desvelado detalles inéditos del proceso, así como las medidas defensivas que adopta la cucaracha para no caer presa.

La larva naciente depende de la pericia materna para hallar el punto débil en el cuerpo acorazado de la cucaracha. Si no lo encuentra, muere de inanición.

PÁGINAS ANTERIORES: ANAND VARMA/NATIONAL GEOGRAPHIC STOCK

especialista con una única opción; en su caso, la cucaracha *Periplaneta americana*. La identidad de la víctima es una de las razones por las que la avispa cae tan bien, incluso a las personas que padecen fobia a los insectos. Dice el proverbio: el enemigo de mi enemigo es mi amigo.

Sin embargo, los biólogos la admiran por su notable táctica de caza. Frederic Libersat, de la Universidad Ben Gurion del Negev, en Israel, y sus colaboradores (entre ellos el especialista en venenos Michael Adams, de la Universidad de California en Riverside) han realizado una serie de estudios impecables que hilvanan un relato digno de la ciencia ficción. Todo comienza cuando una hembra de avispa esmeralda localiza a una infortunada cucaracha.

La avispa se lanza al ataque de un modo sutil. Como si de un neurocirujano se tratara, clava el aguijón en un punto preciso del sistema nervioso central de la cucaracha, con el propósito de paralizarla: el primer ganglio torácico, que acoge las motoneuronas que controlan las patas delanteras. El veneno de la cazadora contiene ácido gamma-aminobutírico (GABA), un neutrotransmisor inhibidor que inactiva las motoneuronas y paraliza temporalmente las extremidades. Esa primera picadura de precisión quirúrgica deja a la cucaracha indefensa ante el aguijonazo siguiente, que la avispa propina en las membranas blandas de la garganta y que llega directamente al cerebro de la víctima. Esta segunda dosis de veneno tiene el efecto insidioso de transformar a la rabiosa oponente en un pelele dócil y pacífico, que a todos los efectos es un zombi.

De aquí en adelante la situación se vuelve cada vez más negra para la pobre cucaracha. El veneno que le ha inyectado en el cerebro contiene dopamina, otro neurotransmisor que hace que no cese de frotarse las patas y las antenas, en lugar de poner pies en polvorosa. La avispa marcha entretanto en búsqueda de un agujero donde enterrarla viva, con un huevo suyo. Una vez encuentra el lugar adecuado, regresa junto a la cucaracha y hace algo que podría parecer gratuito en una película de terror. Le arranca casi de cuajo una de las antenas sensoriales y, a continuación, hace lo mismo con la otra. Y, como si fuesen pajitas, succiona la sangre que mana de los muñones. Podemos pensar que la sangre de la cucaracha es el suplemento alimenticio favorito de la avispa, que tras de la lucha enconada le aporta energía y nutrientes. Después la agarra por uno de los muñones y tira de ella hasta que le sigue como un perro sujeto por la correa. Una vez dentro de la tumba, la avispa pega un único huevo pequeño a una de las dos patas intermedias de su presa. Por último, abandona la tumba, no sin antes tapar a conciencia la entrada con desechos de los alrededores.

Hagamos un alto para reflexionar sobre este sorprendente ser, producto de la evolución. A cualquier depredador ya le resulta bastante difícil acechar, capturar y dar muerte a presas escurridizas, pero la avispa esmeralda tiene otro imperativo aún mayor: tomar una prisionera que sirva de despensa viviente a la larva que nacerá del huevo. Con ese fin tiene que inyectar el veneno en dos pequeños puntos del sistema nervioso ubicados en el cuerpo acorazado de un insecto que es un especialista en eludir peligros de todo tipo. Ningún otro animal que la ciencia conozca posee medios tan refinados para manipular el sistema nervioso de otro. Y la historia no acaba aquí.


1


2

LA LARVA DE LA AVISPA devora por dentro a la cucaracha viva (*1*) y emerge del cuerpo de esta una vez que alcanza la madurez (2).

EMANUELE BIGGI/SCIENCE SOURCE

INTUICIÓN MATERNA

Estoy seguro de no equivocarme si afirmo que nadie que haya visto *Alien, el octavo pasajero* ha salido jamás del cine preguntándose qué pruebas y adversidades tuvo que superar la pobre cría de parasitoide después de escabullirse de la mesa del comedor de la Nostromo. Lo mismo se puede decir de la larva de la avispa esmeralda. Hasta los propios científicos que la estudian suelen dar paso a los créditos una vez que la avispa encierra en su tumba a la cucaracha. Se supone que la larva saldrá del huevo diminuto, buscará un punto blando por donde comenzar a comer y atravesar la cutícula para devorar por dentro a la cucaracha viva, hasta emerger triunfante del mismo modo que el monstruo parasitoide de *Alien*.

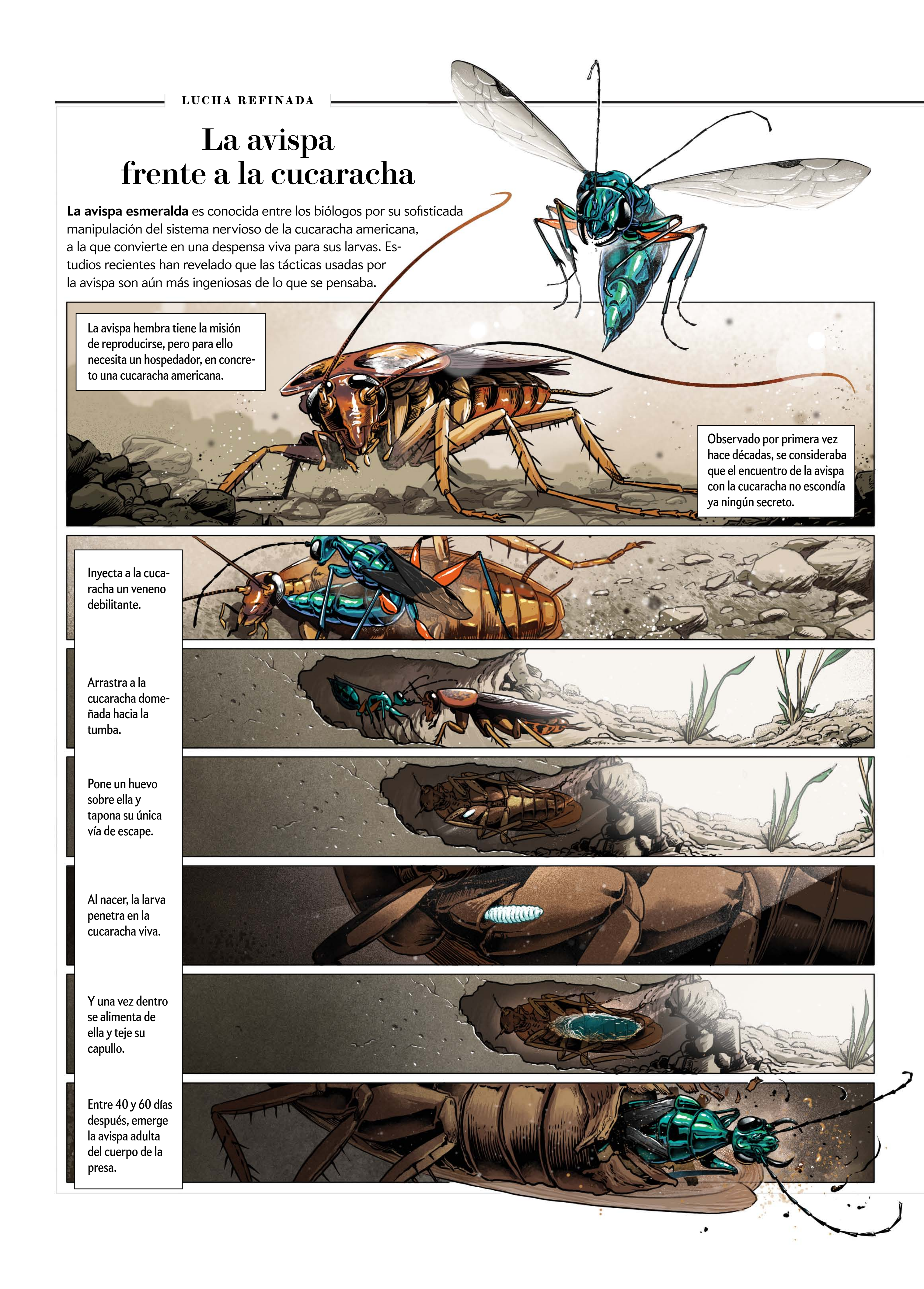
Pero las cosas no son tan fáciles para esta devoradora en ciernes, como pude comprobar cuando otros proyectos distra-

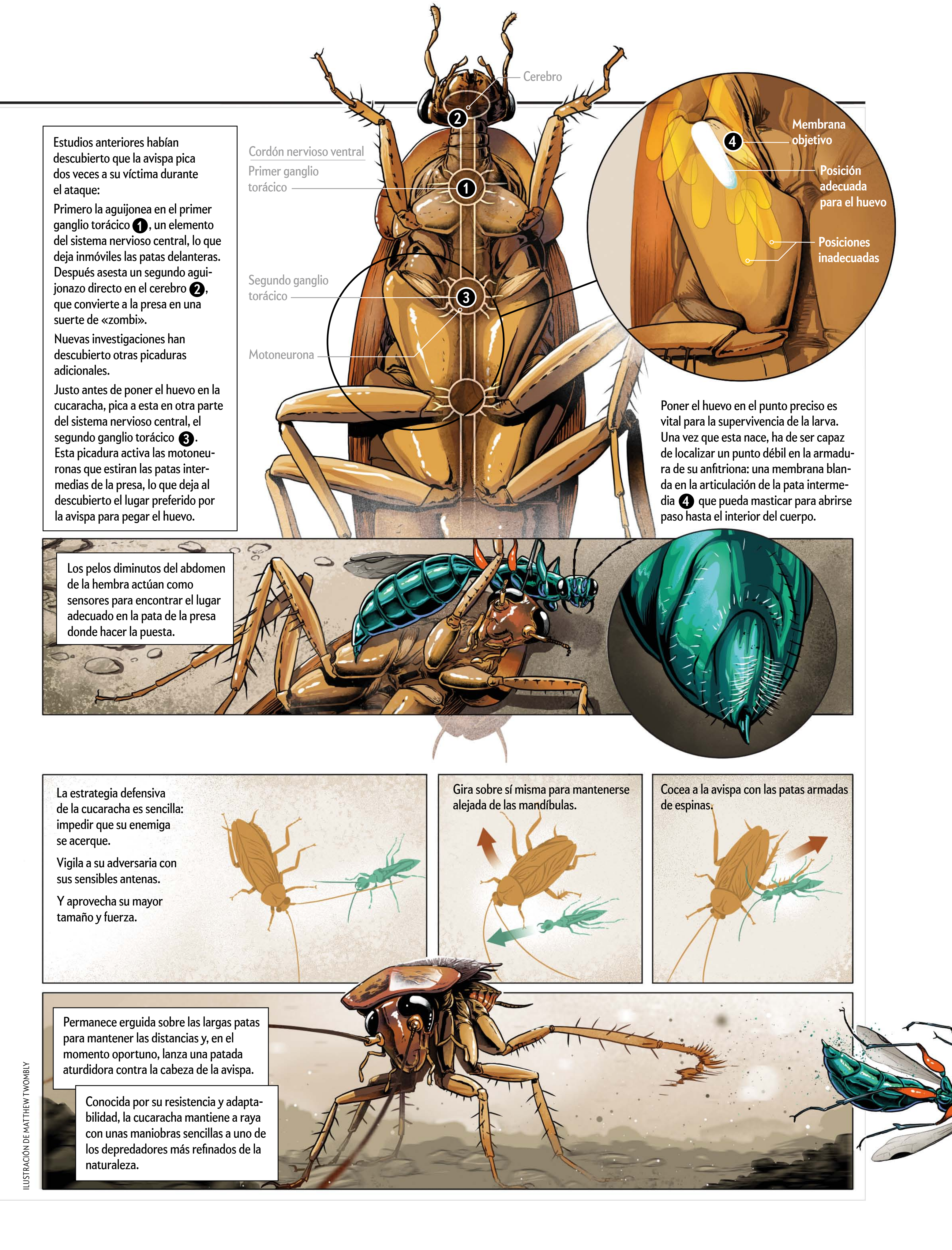
Continúa en la página 32

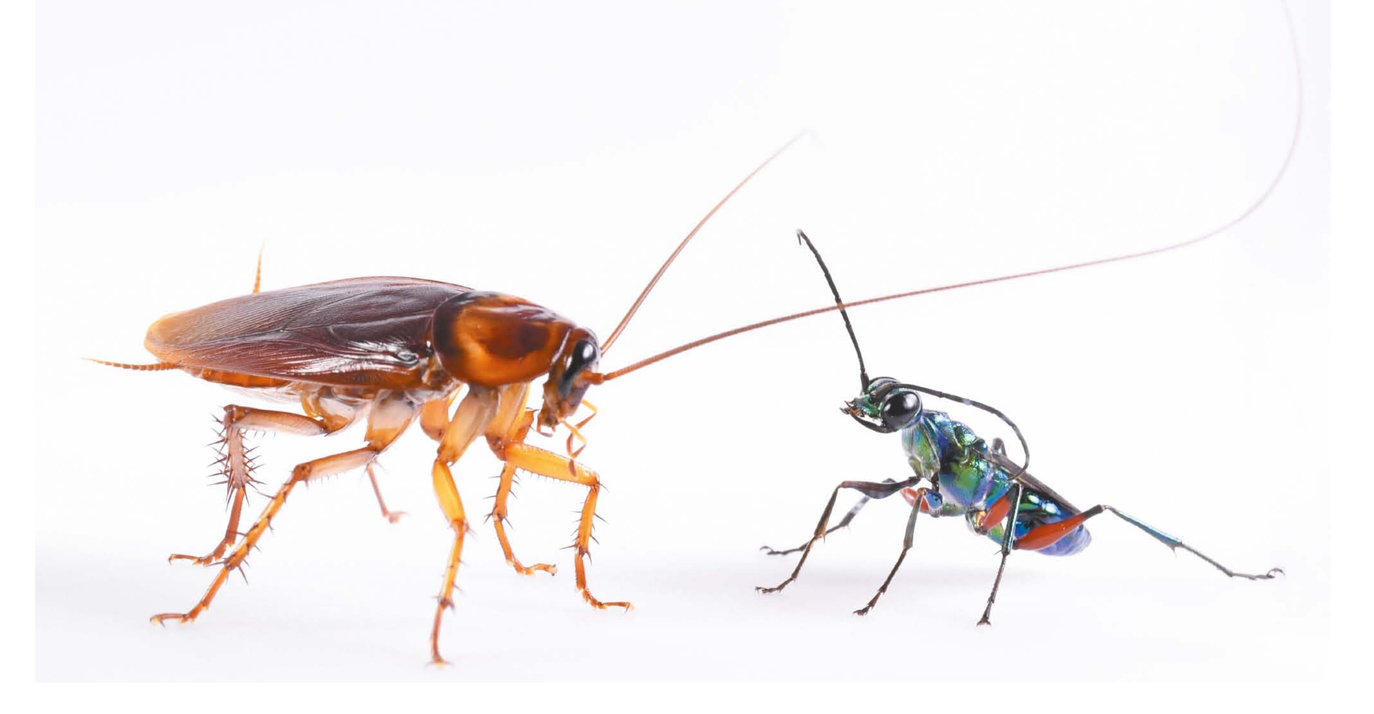
LUCHA REFINADA

La avispa frente a la cucaracha

La avispa esmeralda es conocida entre los biólogos por su sofisticada manipulación del sistema nervioso de la cucaracha americana, a la que convierte en una despensa viva para sus larvas. Estudios recientes han revelado que las tácticas usadas por la avispa son aún más ingeniosas de lo que se pensaba.




Cerebro
Cordón nervioso ventral
Primer ganglio torácico
Segundo ganglio torácico
Motoneurona
Membrana objetivo
Posición adecuada para el huevo
Posiciones inadecuadas
Estudios anteriores habían descubierto que la avispa pica dos veces a su víctima durante el ataque:
Primero la aguijonea en el primer ganglio torácico 1, un elemento del sistema nervioso central, lo que deja inmóviles las patas delanteras. Después asesta un segundo aguijonazo directo en el cerebro 2, que convierte a la presa en una suerte de «zombi».
Nuevas investigaciones han descubierto otras picaduras adicionales.
Justo antes de poner el huevo en la cucaracha, pica a esta en otra parte del sistema nervioso central, el segundo ganglio torácico 3. Esta picadura activa las motoneuronas que estiran las patas intermedias de la presa, lo que deja al descubierto el lugar preferido por la avispa para pegar el huevo.
Poner el huevo en el punto preciso es vital para la supervivencia de la larva. Una vez que esta nace, ha de ser capaz de localizar un punto débil en la armadura de su anfitriona: una membrana blanda en la articulación de la pata intermedia 4 que pueda masticar para abrirse paso hasta el interior del cuerpo.
Los pelos diminutos del abdomen de la hembra actúan como sensores para encontrar el lugar adecuado en la pata de la presa donde hacer la puesta.
La estrategia defensiva de la cucaracha es sencilla: impedir que su enemiga se acerque.
Vigila a su adversaria con sus sensibles antenas.
Y aprovecha su mayor tamaño y fuerza.
Gira sobre sí misma para mantenerse alejada de las mandíbulas.
Cocea a la avispa con las patas armadas de espinas.
Permanece erguida sobre las largas patas para mantener las distancias y, en el momento oportuno, lanza una patada aturdidora contra la cabeza de la avispa.
Conocida por su resistencia y adaptabilidad, la cucaracha mantiene a raya con unas maniobras sencillas a uno de los depredadores más refinados de la naturaleza.
ILUSTRACIÓN DE MATTHEW TWOMBLY



CUANDO UNA AVISPA SE APROXIMA, algunas cucarachas se preparan para repelerla y adoptan la postura «en zancos», que semeja la posición de en guardia del esgrimista.

Viene de la página 29

jeron mi atención y estuve a punto de perder mi colonia de avispas. Solo entonces controlé cada una de las larvas, con la esperanza de que acabaría contando con las avispas suficientes para rehacerla. La colonia sobrevivió, pero si algo aprendí de esta experiencia es que las diminutas larvas de cuerpo blando no son muy competentes. A diferencia de las endemoniadamente ágiles crías de *Alien*, se mueven con lentitud, cuando lo hacen, y solo podrán comer si dan con una membrana blanda de la cucaracha. Si yerran por una fracción de milímetro, mueren (y la afortunada cucaracha se recupera de la picadura en el cerebro transcurrida una semana).

La fragilidad de la larva impone una gran presión a la madre, que debe pegar el huevo en el lugar idóneo para que pueda sobrevivir. ¿Cómo lo consigue? Para indagar en esta cuestión, le di la vuelta a un microscopio, lo atornillé a una mesa y preparé un cubículo con fondo transparente como tumba tentadora para la sepulturera. Gracias a este montaje conseguí grabar en primer plano todo el proceso de la puesta. En el vídeo pude ver cómo la avispa palpaba con minuciosidad la pata de la cucaracha con la punta de su abdomen antes de poner el huevo justo al lado de un punto débil de la armadura de su presa. (Como todos los insectos, las cucarachas poseen un exoesqueleto duro, pero como en una armadura medieval, las articulaciones son puntos débiles.) Cuando examiné la punta del abdomen de la avispa con un microscopio electrónico de barrido, descubrí unos pelos minúsculos, muy parecidos a un bigote en miniatura. ¿Necesitaría los sensores para encontrar el lugar adecuado para el huevo?

Para verificar esa posibilidad, anestesié algunas avispas y les extirpé los pelos. Quizá suene fácil, pero se trata de una operación tan delicada como cómica, que solo pude efectuar sosteniendo con dos dedos a la avispa semidormida (que pronto despertaría, muy enojada) mientras afeitaba con suavidad el equivalente de sus partes íntimas con un bisturí afiladísimo de obsidiana. No las tenía todas conmigo, pero funcionó y los resultados confirmaron mi sospecha: las avispas rasuradas tenían problemas para hallar el punto justo donde poner el huevo. Con esta observación no solo hallé un sensor clave para la puesta, sino que me confirmó la suma importancia de que el huevo quede depositado en el lugar correcto. Todas las larvas que nacían en el lugar incorrecto solían morir sin encontrar el punto débil de la cucaracha.

UN DESCUBRIMIENTO FORTUITO

Mientras andaba estudiando los pelos sensoriales de la avispa y la supervivencia de la larva, descubrí algo del todo inesperado. Antes de que las hembras dieran con el punto justo para poner el huevo, extendían la punta del abdomen y palpaban reiteradamente el centro de la cucaracha, por delante de las patas intermedias. Esta solía estirar la pata en cuestión hacia el lado donde se hallaba la avispa, como si le molestase que le golpearan el vientre.

Al principio no supe interpretar este comportamiento. Parecía una distracción de la misión reproductora de la avispa, así como de la mía propia, averiguar el cometido que desempeñan los pelos sensoriales. Pero al final decidí examinar más de cerca el tanteo de la avispa observándola a mayor aumento en el microscopio. Me quedé sorprendido al comprobar que no estaba palpando el vientre de la cucaracha. En lugar de eso, vi que el aguijón de la avispa se extendía por debajo de la cutícula traslúcida de la presa. ¿Qué era aquello? Todos los que estudian la avispa esmeralda saben que aguijonea dos veces: una en el primer ganglio torácico para paralizar las patas delanteras de la cucaracha y otra en el cerebro para domeñarla. Tal vez estuviera observando una avispa confundida, un ejemplar atípico que no se estaba comportando con normalidad.

Decidí desviar el objetivo, en sentido literal y figurado, y perseverar en esa observación. No tardé en descubrir que, antes de la puesta, la hembra propina tres aguijonazos en la parte central del cuerpo de la cucaracha en una parte muy concreta de su armadura, llamada basisternón, situada sobre el segundo ganglio torácico, otro elemento del sistema nervioso central. Recordemos que en el ataque inicial propina uno en el primer ganglio torácico, que paraliza las patas anteriores. Como cabe suponer, el segundo ganglio alberga las motoneuronas que controlan el segundo par de patas, que es el elegido por la avispa para poner el huevo. Reparé en que el extraño estiramiento

KENNETH C. CATANIA

que había presenciado tenía lugar unos segundos antes que las nuevas picaduras recién descubiertas. Parecía que el aguijón obligaba de algún modo a la cucaracha a estirar la pata. ¿Podría ser otro paso más en el proceso de adueñarse de la mente de su víctima?

Parecía posible, ¿pero cómo podía averiguar si el aguijón iba realmente dirigido al segundo ganglio torácico, ubicado en el interior de la cucaracha? La misma pregunta se había planteado con la primera picadura dirigida contra el primer ganglio torácico, que fue objeto de un largo debate hasta que Libersat resolvió de una vez por todas la incógnita con una idea ingeniosa. Convirtió la avispa en radiactiva, y con ello también su veneno. Y una vez que picó a su víctima, pudo demostrar que la radiactividad quedaba confinada en el primer ganglio.

Confieso que no soy tan osado como Libersat cuando se trata de convertir en radiactivas las avispas, ni capaz de tramitar todo el papeleo exigido para obtener el permiso para hacer tal cosa. Por suerte, había otro modo más directo de averiguar dónde clavaba el aguijón. Anestesié a una cucaracha y recorté un pequeño pedazo de la cutícula para dejar al descubierto el ganglio. Después aumenté la potencia de aumento del microscopio y observé las acometidas de la avispa. Sin duda, dirigía el aguijón contra el ganglio. (Este enfoque no funcionaría para advertir el primer aguijonazo, porque ocurre durante la lucha con la avispa.) Mejor aún, apuntaba el aguijón hacia el lado del ganglio que controla la pata situada en el mismo lado en que se encuentra la avispa, el lado donde después pegará su huevo.

Queda bastante claro que el veneno que inyecta con esas últimas picaduras contiene un componente que activa las motoneuronas del segundo ganglio torácico, lo que provoca que la pata se estire.

¿Cuál es la razón de esa maniobra, tan especializada? Dicho de otro modo: ¿de qué modo el estiramiento de la pata de la cucaracha facilita la reproducción de la avispa? Esta vez, la respuesta era evidente. Si la víctima dobla la pata intermedia, la agresora no puede palpar la superficie con sus pelos sensoriales en busca del punto idóneo para su huevo, en el que la larva comenzará a comer y por el que penetrará en el cuerpo de la víctima. Al apoderarse del circuito nervioso que controla el estiramiento de la pata, la avispa neutraliza la última barrera defensiva de que dispone la cucaracha para burlar a su horrible destino. No se sabe de qué modo el veneno causa esa respuesta, pero sí cuál es el neurotransmisor que probablemente activa las neuronas: la acetilcolina. El veneno de muchas avispas contiene acetilcolina, probablemente en cantidad suficiente para activar las motoneuronas y provocar el estiramiento de la pata. Habrá que seguir estudiando este aspecto para comprobar si esta explicación sencilla es correcta o, si en cambio, interviene otro componente del veneno.

Tal vez ahora entienda el lector por qué me impresionó tanto esta avispa. A lo largo de su evolución, ha desarrollado el comportamiento y el veneno necesarios para acertar consecutivamente en tres pequeños puntos del sistema nervioso de la cucaracha. Cada picadura causa un efecto diferente, y cada una le permite dominar a la presa a voluntad, hasta que esta, esquiva y peligrosa en un principio, queda a merced de una pequeña y endeble larva, que es su cría. Al igual que para la tripulación de la nave Nostromo, todo parece perdido para la cucaracha. Pero el monstruo alienígena tropezó con la horma de su zapato en el personaje encarnado por Sigourney Weaver: Ellen Ripley. ¿Qué ocurre cuando una avispa topa con el equivalente cucarachil de la teniente Ripley?

PLANTAR CARA

Hasta ahora he narrado de qué modo la avispa derrota a la cucaracha con varias picaduras asestadas en su sistema nervioso central. El desenlace parece inevitable si la atacante consigue sorprender a la presa o si esta decide huir. En ambos casos, la atacante acaba imponiéndose fácilmente, ya sea agarrándola de inmediato o lanzándose en su persecución, pues la cucaracha no puede escapar de la avispa en vuelo. Una vez que esta logra atenazarla con las mandíbulas, normalmente consigue asestar el primer aguijonazo paralizante en menos de un segundo; y ya sabemos el macabro final de esta historia.

Pero algunas cucarachas no actúan de esa guisa. Permanecen vigilantes, tanteando con sus antenas largas en busca de cualquier amenaza que se aproxime. Y cuando una avispa anda cerca, no emprenden la huida, sino que se preparan para el combate, alzándose todo lo que les permiten sus largas patas espinosas. En esta posición, llamada «en zancos», la cucaracha recuerda mucho a un esgrimista en la posición de en guardia. De hecho, la postura parece cumplir un fin similar: aleja su cuerpo de la agresora, lo que la convierte en un blanco más distante y difícil de alcanzar. Al mismo tiempo orienta hacia la avispa las patas, armadas con una falange de espinas puntiagudas, mientras esta intenta alcanzar el cuerpo vulnerable de la cucaracha. Si no la agarra, la avispa no puede propinar el primer aguijonazo. Los contendientes trazan círculos frente a frente, mientras avanzan y retroceden sucesivamente. A menudo, la avispa arremete contra la cucaracha, que se agacha y se aparta para esquivar las mandíbulas antes de recuperar su postura defensiva.

Pero la verdadera sorpresa para mí en el curso de las observaciones de esos encuentros, y por lo visto también para la avispa, fueron las fuertes patadas que la cucaracha propina con sus patas traseras erizadas. A menudo consigue lanzar coces certeras contra la cabeza de su enemiga, que sale disparada por los aires hasta impactar contra el objeto más cercano. Implacable, la avispa se recupera del golpe con un rápido acicalamiento y reanuda el ataque, por lo menos tras la primera coz. Pese a ello, si la presa logra propinarle varias, desistirá. Todo indica que, para no acabar anulada y devorada por dentro, la cucaracha emplea la misma táctica que muchos personajes de ciencia ficción: permanecer en guardia, no huir y apuntar a la cabeza del agresor. IyC

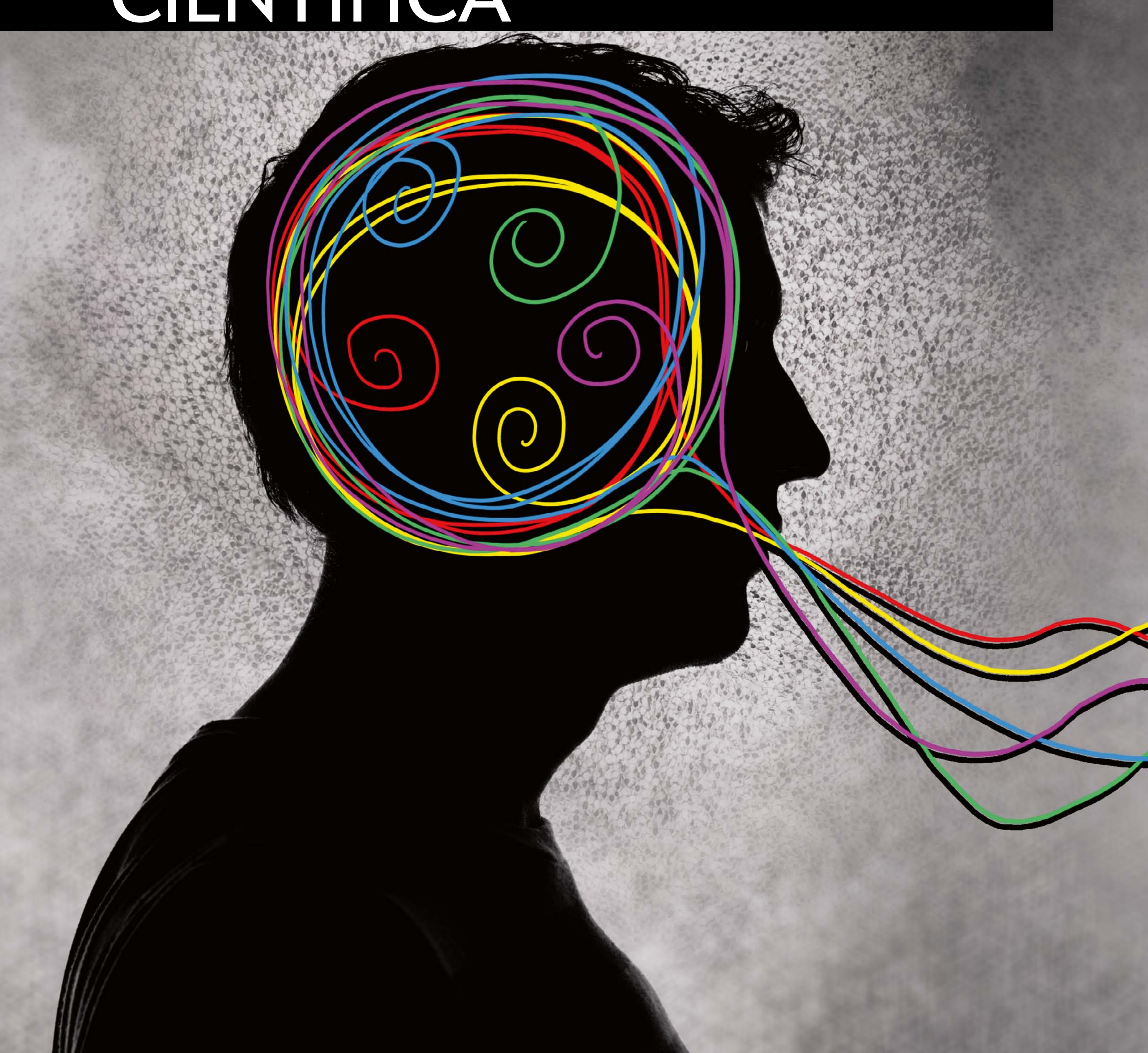
PARA SABER MÁS

Direct injection of venom by a predatory wasp into cockroach brain. Gal Haspel, Lior Ann Rosenberg y Frederic Libersat en *Journal of Neurobiology*, vol. 56, págs. 287-292, septiembre de 2003.
Molecular cross-talk in a unique parasitoid manipulation strategy. Maayan Kaiser et al. en *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, vol. 106, págs. 64-78, marzo de 2019.
Getting the most out of your zombie: Abdominal sensors and neural manipulations help jewel wasps find the roach's weak spot. Kenneth C. Catania en *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 95, págs. 181-202, diciembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

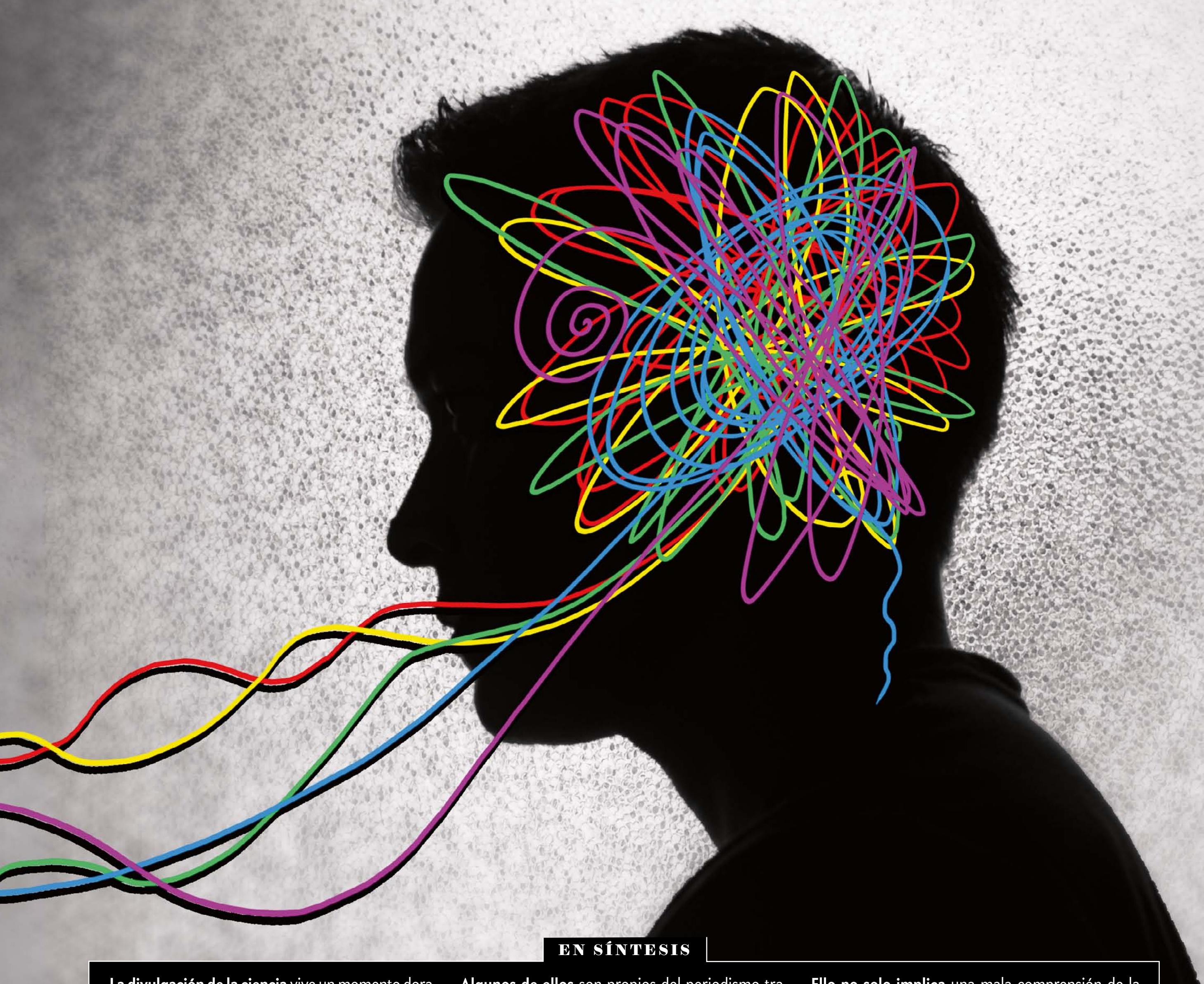
Un depredador nato. Kenneth C. Catania en *IyC*, junio de 2011.
Insectos que convierten a otros en zombis. Christie Wilcox en *IyC*, febrero de 2017.
La temible y electrizante anguila. Kenneth C. Catania en *IyC*, julio de 2019.

ERRORES Y SENSACIONALISMO EN LA DIVULGACIÓN CIENTÍFICA



La comunicación de la ciencia vive un momento explosivo gracias al auge de los nuevos medios. Esta situación ha derivado en una avalancha informativa donde los problemas clásicos del periodismo se han multiplicado

Tomás Ortín y Ángel Uranga



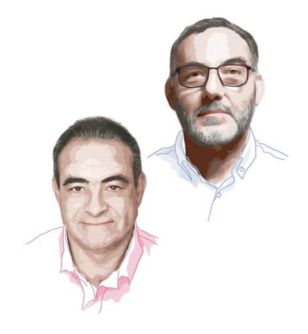
EN SÍNTESIS

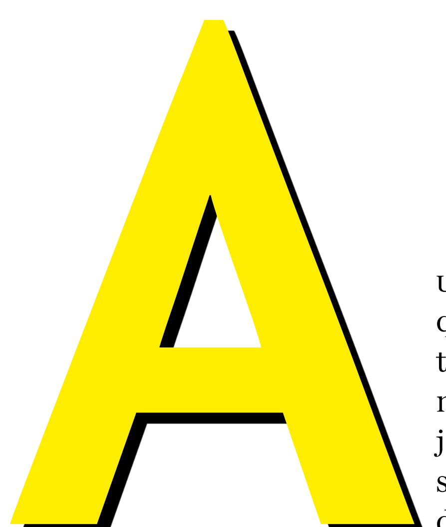
La divulgación de la ciencia vive un momento dorado gracias al auge de los medios digitales y las redes sociales. Sin embargo, esa facilidad para dar y recibir información ha exacerbado algunos problemas que afectan a la calidad de la comunicación.

Algunos de ellos son propios del periodismo tradicional, como la precipitación informativa o la mitomanía. Otros se deben a un mal uso de las herramientas propias de la divulgación científica, como las analogías y las simplificaciones.

Ello no solo implica una mala comprensión de la ciencia por parte del público, sino que erosiona los estándares de lo que se considera riguroso y abona el terreno para los bulos y la desinformación. Varios ejemplos tomados de la física ilustran la situación.

Tomás Ortín y **Ángel Uranga** son investigadores del Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC.





UNQUE A VECES NOS PAREZCA QUE LA EDAD HEROICA DE LA CIENCIA YA quedó atrás, vivimos tiempos de descubrimientos emocionantes. Nunca antes la investigación científica ha sido tan intensa ni ha cubierto un abanico tan amplio de temas. Tampoco ha sido jamás una actividad tan global, tan respaldada por una inversión económica tan grande ni ha alcanzado un punto tan alto de prestigio social.

A nadie puede sorprender, pues, que el público muestre cada vez más interés por seguir los descubrimientos científicos; bien porque van a modelar nuestra comprensión del mundo o nuestra economía, o bien por pura y simple curiosidad. Al mismo tiempo, muchos científicos desean estar al tanto de lo que ocurre en otros campos ajenos a su especialidad. Esta demanda creciente de información científica ha coincidido con la toma de conciencia de los propios científicos de que la sociedad que nos ampara y apoya nuestro trabajo merece saber a qué nos dedicamos, qué descubrimos y cómo eso puede beneficiarle (o perjudicarle). Y a veces, sin más, hay un encuentro feliz entre la simple curiosidad y el puro placer de hablar de lo que te apasiona.

Estos encuentros y confluencias de intereses son el motor de la divulgación científica como área cultural por derecho propio. Un área cultural que inicialmente se manifiesta en los medios tradicionales a través del género periodístico, literario o cinematográfico, pero que, al entrar en lo que bien merece llamarse la «Edad de la Comunicación», comienza a expresarse a través de bitácoras y revistas digitales, canales de vídeo, etcétera.

Todo ello ha convertido a la divulgación científica en un auténtico fenómeno social de nuestro tiempo. La accesibilidad de los nuevos medios ha democratizado esta actividad. Pero lo que en principio debería ser motivo de alegría para los científicos (mayor acceso a los medios por nuestra parte, mayor difusión de nuestro trabajo y la aparición de algunos comunicadores de la ciencia sencillamente fantásticos) se está tornando en causa de preocupación.

Las informaciones deficientes o sensacionalistas, las completas desinformaciones y los meros bulos que han circulado en las redes sociales sobre los aspectos puramente científicos de la pandemia o del cambio climático constituyen algunos de los ejemplos más graves de la situación. Pero hay muchos otros. La mayoría son considerados intranscendentes porque no afectan a nuestra salud —¿a quién le preocupan los terraplanistas?—. Pero, día a día, erosionan los estándares de lo que se considera contrastable, riguroso y, en definitiva, creíble y veraz a partir del conocimiento disponible. Como científicos, creemos que el ideal de búsqueda de la verdad es irrenunciable. Como ciudadanos, tememos que se cumpla la advertencia de Juan Goytisolo: «Se empieza aprobando errores y se acaba siendo condescendiente con los horrores». Y la verdad no se establece sumando *likes*, lectores o visitantes.

Los problemas que hoy aquejan a la divulgación científica son, en esencia, los mismos que afectan al mundo de la comunicación en general: la crisis de los medios tradicionales por la competencia de las redes sociales y los oligopolios que las respaldan, y el aumento exponencial del flujo informativo. Las consecuencias son también similares: la rebaja de la calidad y la fiabilidad de la información, con la aparición de bulos y desinformaciones motivados por razones políticas, ideológicas o económicas, y la desaparición de un espíritu crítico auténtico. Sin embargo, estos problemas y sus consecuencias tienen características específicas en el ámbito de la divulgación científica.

A continuación veremos algunos de estos problemas. Los ejemplos que hemos escogido para ilustrarlos están tomados de nuestra área de trabajo, pero creemos que son representativos de un fenómeno más general. También propondremos algunas soluciones que condensaremos en un decálogo de buenas prácticas que, en nuestra opinión, ayudarían a mejorar la divulgación científica.

¿QUÉ IMPLICA INFORMAR Y DIVULGAR?

Informar al público sobre cualquier cuestión supone seleccionar la información (suprimiendo parte de ella, con lo que queda incompleta) y adaptar el lenguaje (eliminando tecnicismos, con lo que pierde precisión). Informar de la actualidad científica en el siglo XXI a partir de sus fuentes originales (los artículos científicos, en general) exige hacer ambas cosas en un grado mucho mayor. Hacer, de esta forma, inteligibles para quienes no son expertos los avances y descubrimientos sin desvirtuar la información es lo que entendemos por divulgar.

Explicar la ciencia al gran público exige hacer simplificaciones y usar todo tipo de recursos. El problema reside en que el equilibrio entre la simplificación y la deformación de la realidad resulta muy difícil de mantener. Una cuestión previa que debemos plantearnos en la divulgación científica es la siguiente: ¿merece la pena simplificar una información hasta que el público la entienda, si lo que finalmente entiende queda demasiado lejos de la información original? ¿Es ético hacer creer al público que ha entendido algo, cuando lo que se le ha explicado no se corresponde con la realidad?

Nuestra opinión —que no es universalmente compartida— es que no es ético y que, además, no merece la pena. Creemos que hay momentos en los que se debe ser honesto y decir que ciertas cosas son como son, y que las justificaciones resultan



VERDADES A MEDIAS: Las analogías constituyen un recurso válido en la divulgación de la ciencia. Sin embargo, son también un arma de doble filo. Si no se explican claramente sus límites, pueden inducir ideas erróneas sobre el fenómeno que pretenden explicar.

IMAGEN TOMADA DEL ARTÍCULO «EL ORIGEN DEL UNIVERSO» DE MICHAEL TURNER EN «UNIVERSO CUÁNTICO», *TEMAS DE IyC* N.º 63, ENERO/MARZO DE 2011.

demasiado complicadas para explicarlas. Además, numerosos hechos no tienen una justificación científica conocida: la ciencia construye sistemas lógicos y de saber compatibles con la realidad que observamos en un momento dado, pero dichos sistemas no ofrecen explicaciones últimas sobre por qué existe algo en vez de nada, o por qué lo que existe tiene las propiedades que tiene. Los científicos aceptamos que no todo tiene una justificación final, aunque luchemos cada día por llevar un poco más allá el límite de lo justificable.

Hay quien mantiene que si no se puede explicar una cuestión en términos sencillos es porque no se domina de verdad. Sin embargo, creemos que esto depende del nivel de detalle y de rigor que se quiera adoptar.

¿QUIÉN ESTÁ CAPACITADO PARA DIVULGAR?

El auge de la divulgación ha llevado también a la especialización en niveles y campos. Parte de esta divulgación está dirigida a públicos menos amplios, con mayor formación e intereses específicos, y mucho más exigentes con la completitud y el rigor de la información. Esta «divulgación de alto nivel» solo puede ser hecha por comunicadores con un alto nivel de formación y entraña su propia problemática.

¿Se puede divulgar una información sin entenderla? ¿Está capacitado todo aquel que la entiende para divulgarla? A nuestro parecer, la respuesta a ambas preguntas es claramente «no», pero un «no» que hay que matizar.

Dado que divulgar implica seleccionar y adaptar la información, esto no puede llevarse a cabo del modo correcto sin entenderla bien. La divulgación científica exige formación científica, cuyo nivel dependerá del tipo de divulgación y del público al que va dirigida. La divulgación científica de alto nivel requiere formación especializada de alto nivel. Ciñéndonos al campo en el que nosotros somos especialistas (la física teórica, y solo de partes de ella), hemos visto, leído u oído afirmaciones provenientes de divulgadores como las siguientes: «El tiempo propio pasa más lento cuando estás moviéndote» (el tiempo propio es un invariante relativista); «En un agujero negro de Schwarzschild, la masa está localizada en el origen de las coordenadas esféricas» (el origen de las coordenadas esféricas del agujero negro de Schwarzschild no es un punto bien definido); «La masa de los gravitones es del orden de la masa de Planck» (los gravitones, si existen, o no tienen masa o esta es extremadamente pequeña, mientras que la masa de Planck es enorme); «Un agujero de gusano es muy fácil de detectar con ondas gravitacionales porque es un túnel que nos lleva a otro lado del universo, donde puede haber intensas fuentes de ondas gravitacionales» (nadie sabe si «al otro lado del universo» hay fuentes de ondas gravitacionales y, si las hubiera, nada indica que deban concentrarse en un agujero de gusano y cruzar a nuestro lado); «El magnetismo no es más que un efecto de la fuerza eléctrica debido a la relatividad» (el campo magnético no necesita la fuerza eléctrica para existir); «Electrones, muones, tauones y sus respectivas antipartículas: los neutrinos» (sus antipartículas son los antielectrones, antimuones y antitauones).

En todos estos casos, la revisión de los contenidos por asesores con la formación científica adecuada habría bastado para evitar los errores. Por ello, creemos que la ciencia ha de ser divulgada por quienes tienen un conocimiento conceptual profundo de lo que se quiere divulgar o, como mínimo, con su asesoría. Y de hecho, hay medios y *youtubers* muy famosos que cuentan con asesores de gran nivel científico. En tales casos la información es de enorme calidad, rigurosa y, además, amena, pues la especialidad de los periodistas y la virtud de los buenos *youtubers* es la de comunicar bien.

Por otro lado, no todos los científicos (ni mucho menos) son buenos comunicadores, lo que entraña el riesgo de que la ciencia quede encajonada en el mundo académico. La colaboración entre comunicadores y científicos es quizá la fórmula óptima para la divulgación científica. Es, por cierto, lo que los medios de divulgación de alto nivel o los grandes documentales sobre naturaleza vienen haciendo desde hace tiempo, sin exigir carnet de periodista a los científicos ni carnet de científico a los periodistas.

EL PROBLEMA DE LAS ANALOGÍAS

Sin llegar a los bulos y a la desinformación (los «horrores» de Goytisolo), un problema previo que creemos que desvirtúa el fin mismo de la divulgación científica son los errores que a menudo se cometen en ella. En nuestra opinión, dichos errores se ven exacerbados por cuatro causas: un uso indebido de las

analogías, las simplificaciones excesivas, la precipitación informativa y la mitomanía.

Una de las herramientas fundamentales de la divulgación científica son las analogías, especialmente cuando se trata de explicar conceptos alejados de la experiencia cotidiana. Representarlos en términos de objetos o mecanismos que nos resulten familiares constituye un arma muy poderosa para transmitirlos. Sin embargo, se trata de un arma de doble filo, puesto que no existen las analogías perfectas. O, dicho de otra manera: todas las analogías son, en último término, falsas. Por tanto, su uso debería venir acompañado de un aviso sobre su alcance real, ya que, de lo contrario, pueden hacer creer —erróneamente— que lo que se ha entendido es el concepto original. Para ver a qué nos referimos, a continuación analizaremos tres ejemplos relacionados con nuestras áreas de investigación: uno relativo al mundo de lo muy pequeño (la física de partículas), otro al de lo muy grande (la cosmología) y otro al de la gravedad.

Uno de los descubrimientos recientes más importantes en física de partículas ha sido el del llamado «bosón de Higgs» y su campo asociado. Este campo cuántico desempeña un papel esencial en el mecanismo de Brout-Englert-Higgs (BEH; a menudo se omiten los nombres de Brout y Englert, más adelante discutiremos esta y otras omisiones similares) de generación de masa de las partículas elementales. Cuando este campo tiene la mínima energía posible, en cuyo caso se dice que se halla en su «estado de vacío cuántico», toma un valor constante en el espaciotiempo que no es cero, como quizá cabría pensar. Las partículas elementales interaccionan con ese campo, y dicha interacción se manifiesta como la masa de las partículas.

¿Es ético hacer creer al público que ha entendido algo, cuando lo que se le ha explicado no se corresponde con la realidad?

Entender por qué la interacción entre las partículas elementales y el campo de Higgs se manifiesta de esa manera solo es posible si se examinan las ecuaciones que rigen el modelo estándar de la física de partículas. Pero la tentación de dar una explicación sencilla es demasiado fuerte, por lo que resulta muy común ver comparaciones entre dicha interacción y el rozamiento que sufren los objetos que se mueven a través de un fluido, donde el frenado que experimentan los objetos se asocia a la masa.

Esta analogía debe su popularidad a que evoca acertadamente algunos conceptos del mecanismo de BEH; entre ellos, la presencia de una entidad física que llena el espaciotiempo y con la cual interaccionan las partículas, o la idea de que el vacío cuántico no es «la nada». Sin embargo, la analogía tiene sus propias limitaciones, las cuales deberían explicarse para no llevar a error.

Por ejemplo, si el mecanismo de BEH fuera realmente un rozamiento, las partículas se frenarían hasta detenerse, lo que violaría la ley de la inercia. La analogía tampoco deja claro qué ocurre con las partículas en reposo, las cuales no experimentarían ningún rozamiento aunque también tienen masa. Por último, y desde un punto de vista más técnico, un fluido que llenase el vacío definiría un sistema de referencia privilegiado, similar al éter del siglo XIX, en clara contradicción con la teoría de la relatividad especial. Todas estas consecuencias que implica tomarse la analogía en serio son erróneas: el mecanismo de BEH es compatible con la ley de la inercia, también se aplica a partículas en reposo y no contradice la relatividad especial.

Nuestro segundo ejemplo es la expansión del universo. Según la ley de Hubble-Lemaître, a escalas lo suficientemente grandes, dos galaxias cualesquiera se alejan entre sí a una velocidad que resulta ser proporcional a su separación. Un fenómeno que, en esencia, se debe a que el espacio existente entre ellas aumenta con el tiempo, según nos dicta la solución de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker de la relatividad general.

Una analogía habitual para ilustrar este concepto es usar el ejemplo de un globo con puntos marcados en su superficie. Si el globo se hincha a ritmo constante, todos los puntos se apartarán unos de otros, y la velocidad a la que se alejarán dos puntos cualesquiera será proporcional a su separación. Esta imagen ilustra la ley de Hubble-Lemaître y transmite adecuadamente que la separación entre objetos no se debe a fuerzas locales que los muevan, sino a la expansión del espacio entre ellos.

No obstante, la analogía tiene límites que requieren aclaraciones adicionales. Que el globo tenga un tamaño finito, que se expanda en un espacio ambiente (el «universo» que representa la superficie del globo tiene dos dimensiones, pero el objeto se infla en un espacio de tres) y que hincharlo requiera la aplicación de una fuerza permanente puede llevar a pensar que el universo ha de compartir esas propiedades. Sin embargo, un universo infinito puede también expandirse; la expansión cósmica no requiere que el universo se halle inmerso en ningún espacio de dimensión mayor, y se mantiene por inercia a partir de las condiciones iniciales del universo primitivo (lo que llamamos «gran explosión»), sin necesidad de fuerzas externas que la impulsen.

Nuestro último ejemplo es el que compara la deformación del espaciotiempo en presencia de materia y energía (el fenómeno de la gravedad, según la teoría de la relatividad general) con la deformación de una cama elástica sobre la que se coloca un peso. Esta imagen es tremendamente pregnante y graba de forma indeleble en la memoria la relación entre materia y deformación (curvatura) del espaciotiempo. Sin embargo, y entre otros problemas, la analogía solo hace referencia a la curvatura del espacio, por lo que omite uno de los aspectos fundamentales de la gravedad tal y como queda descrita por la relatividad general: la componente temporal del espaciotiempo y su participación en la deformación y en la curvatura.

EL PROBLEMA DE LAS SIMPLIFICACIONES

Puede que la herramienta más básica para explicar algo complejo sea la simplificación. Mientras que las analogías consisten en reformular un fenómeno en términos de una situación más familiar, las simplificaciones implican la omisión de matices, detalles o contexto: hipótesis que se hacen, condiciones necesarias, consecuencias indeseables, antecedentes, etcétera. La simplificación es inevitable en la divulgación científica. Pero, en la buena divulgación, la elección de la información que se da y la que se omite es óptima, el receptor es advertido de que se le está dando una versión simplificada, y se le indica dónde y cómo completar esa información. De otro modo, la distorsión que inevitablemente conlleva toda simplificación puede conducir a graves errores. Veamos algunos muy comunes, tomados, una vez más, de nuestro campo de investigación.



PRECIPITACIÓN INFORMATIVA: La tentación de publicar resultados impactantes no es ajena a los propios científicos. En 2014, los responsables del experimento BICEP2 (*imagen*) anunciaron como definitivo un resultado provisional con enormes implicaciones sobre el origen del universo. Pocos meses después, la interpretación de los datos se demostró errónea. El episodio tuvo importantes consecuencias para la percepción pública de la teoría de la inflación cósmica.

El espín de las partículas elementales es una propiedad cuántica análoga a la que tendría un objeto que girase sobre sí mismo con un cierto momento angular. Esta explicación, que tampoco es demasiado complicada, se suele simplificar así: «El espín de las partículas elementales describe cómo estas giran sobre sí mismas». Pero las partículas elementales carecen de tamaño: son puntuales y, por tanto, no pueden girar sobre sí mismas. Como consecuencia, la simplificación se convierte en una frase absurda.

En el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, las partículas alcanzan energías similares a las que eran típicas durante los primeros instantes del universo, lo que permite estudiar algunos de los fenómenos que solo se producen en esas condiciones. Este hecho suele expresarse de manera bastante exagerada cuando se dice que «con el LHC se puede reproducir la gran explosión» —¡esperemos que no!—.

La interacción electromagnética entre dos partículas dotadas de carga eléctrica puede explicarse a través del intercambio de «fotones virtuales». Esta es una afirmación correcta, pero que no abarca todas las situaciones que se dan en la naturaleza. Por ejemplo, una partícula cargada puede interaccionar con un campo electromagnético macroscópico muy alejado de las cargas que lo produjeron, en cuyo caso la interacción puede entenderse en términos del intercambio de fotones virtuales entre el campo y la partícula. Cuando se omite esta parte en la descripción de la interacción electromagnética, se llega a confusiones muy curiosas, como que un agujero negro con carga eléctrica no puede atraer a una partícula cargada que se encuentre en su exterior porque los fotones virtuales no pueden escapar del agujero negro y alcanzar la partícula.

Decir que «el fondo cósmico de microondas es el eco de la gran explosión» es poco más que expresar de una forma poética que dicha radiación contiene información sobre las primeras etapas de la evolución del universo. Pero, tomada literalmente, lleva a todo tipo de confusiones. La «primera imagen de un agujero negro», captada en 2019 por el Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT), es solamente la de la materia caliente y brillante que lo rodea.

Todos estos ejemplos están tomados de la física y, como tales, pueden parecer inocuos. Sin embargo, promover una cultura que tolera las falsas explicaciones y las simplificaciones exageradas no solo redunda en una mala comprensión de la ciencia por parte del público, sino que abona el terreno para otras consecuencias más graves. Ello se debe a que algunas simplificaciones tienen un claro sesgo y voluntad de confundir, como ocurre especialmente con algunas cuestiones tecnológicas o ecológicas en las que hay grandes intereses económicos.

EL PROBLEMA DE LA PRECIPITACIÓN

Más allá de un uso indebido o incompleto de las herramientas pedagógicas típicas de la divulgación científica, otros factores que la desvirtúan pueden relacionarse con algunos problemas más tradicionales del periodismo. Uno de ellos es la obsesión de los periodistas por adelantarse a los demás a la hora de dar una noticia. Para ello hay que sondear continuamente las fuentes, que en el caso de la ciencia son en general las publicaciones técnicas. Hoy en día, sin embargo, antes de mandar un trabajo a una revista especializada, cualquiera puede publicarlo en un repositorio de Internet para agilizar la difusión de los resultados. En tal caso, estos deberán considerarse provisionales, en el sentido de que no habrán recibido aún la confirmación convencional que proporciona la revisión por pares. Algunos de esos artículos nunca conseguirán pasar dicho filtro. Y, entre los que finalmente lo superan, hay multitud de resultados e ideas que deben ser interpretados como propuestas o como teorías especulativas, las cuales pueden desempeñar un papel importante para el desarrollo de la ciencia en su conjunto, pero que tal vez no guarden una relación directa con la realidad. Así pues, las fuentes del periodismo científico han de interpretarse con suma cautela, y las informaciones han de ser matizadas como provisionales y contrastadas con las opiniones de otros investigadores.

Pero la tentación de publicar titulares impactantes es a veces demasiado fuerte, y el público parece no cansarse de ser informado de teorías revolucionarias una vez por semana. Pero cuando la información sensacionalista habla, sin ningún tipo de prevención, contraste o matiz, de tratamientos médicos revolucionarios, de que se puedan producir o no catástrofes, del origen de algunos virus o de la relación entre ciertos trastornos y las vacunas, la frivolidad se nos antoja intolerable. De nuevo, aceptar errores lleva a condonar horrores.

Este fenómeno es un signo de los tiempos y a él tampoco somos ajenos los científicos, que, como personas de carne y hueso, no somos inmunes a la vanidad. Un ejemplo de sensacionalismo promovido por los propios científicos y que tuvo importantes consecuencias fue el anuncio, en marzo de 2014, del descubrimiento de los llamados «modos B primordiales» en el fondo cósmico de microondas por parte del experimento BICEP2

PROPUESTAS

¿Cómo mejorar la divulgación científica?

La divulgación de la ciencia mejoraría si los comunicadores adoptaran un compromiso de buenas prácticas como las que se proponen en este decálogo. Algunas trasladan al ámbito de la divulgación científica varios de los códigos del periodismo tradicional; otras hacen referencia a un uso responsable de los nuevos medios digitales y a una mayor transparencia en la comunicación con el público.

1. Hablar solo de aquello de lo que se tienen suficientes conocimientos o asesorarse con expertos. Muy a menudo, la divulgación ideal es fruto del trabajo colaborativo e interdisciplinar entre científicos y comunicadores.

2. Indicar la formación científica del divulgador. El público reconoce cada vez mejor la diferencia entre licenciados, graduados, doctores, profesores o másteres, y debería poder juzgar si la información que recibe está emitida por alguien que se halla en condiciones de tener un conocimiento profundo sobre ella.

3. Dejar siempre claro qué es riguroso y qué es una comparación, alegoría o símil que proporciona una idea intuitiva pero, en el fondo, incorrecta. No podemos dejar que el público crea que ha entendido realmente algo si lo único que se le ha explicado es una primera aproximación.

4. Citar todas las fuentes, tanto científicas como de divulgación. Eso permitiría a quien lo desee ampliar la información y reconocería a los autores de los trabajos originales. Por otro lado, muchas explicaciones sencillas de resultados científicos han sido concebidas por otros divulgadores, quienes también merecen un reconocimiento.

5. Indagar en la historia de los descubrimientos y citar a todos los que han contribuido. Es importante contrastar versiones, evitar los relatos de parte y la creación de mitos que, aunque puedan resultar atractivos para el público, falsean la historia y el funcionamiento de la ciencia y desaniman a los investigadores jóvenes.

6. Establecer una separación clara entre información y opinión. Esta norma clásica del periodismo no se encuentra todo lo extendida que debería en el ámbito de la divulgación.

7. Reconocer los límites del propio conocimiento. A diferencia de los medios clásicos, las redes sociales permiten la interacción entre el emisor y el receptor. Pero la función del comunicador no es la de ser un oráculo ni tener respuestas para todo. Decir «no lo sé» es honesto y evita incurrir en errores.

8. Hacer pública y respetar la política de aceptación de comentarios. Los criterios por los que los periódicos generalistas publican cartas al director son bastante opacos, y esa opacidad se ha propagado a los nuevos medios. Tanto los medios periodísticos como los comunicadores deberían adoptar medidas de mayor transparencia.

9. Evitar la censura destinada a encubrir errores. No borrar de los artículos o los vídeos las respuestas a los comentarios del divulgador. En vez de reescribir u ocultar la historia, es más honesto reconocer los errores y explicarlos. Todos aprendemos más así.

10. Rectificar los errores. En ocasiones, el reconocimiento de errores parece tomarse por un síntoma de flaqueza y es evitado a toda costa por quienes viven de cara al público. Por otro lado, que la opinión pública, magnificada a través las redes sociales, se ensañe con quien reconoce un error no contribuye a que estos se corrijan. Sean cuales sean las razones, tales rectificaciones no suelen producirse. Sin embargo, no puede dejarse al público en el error.

[*véase* «Tras las huellas de la inflación», por Robert Schwarz; Investigación y Ciencia, julio de 2014]. En teoría, tales modos eran la «huella» de las ondas gravitatorias producidas durante el periodo inflacionario del universo, y su supuesta detección se presentó como la prueba definitiva a favor de la teoría de la inflación cósmica; en particular, del modelo de inflación caótica de Andrei Linde. El anuncio coincidió con la publicación de un vídeo en el que un miembro del experimento se acercaba a la casa de Linde para darle la sorpresa del descubrimiento. Un descubrimiento que habría merecido un premio Nobel, pero que no tardó en ser puesto en cuestión y finalmente descartado al contrastarlo con otras observaciones.

Sin embargo, la forma en que se anunció aquel resultado provisional tuvo serias consecuencias. En 2014 ya se habían verificado las predicciones más básicas de la teoría inflacionaria que cabía comprobar experimentalmente. Y quizá, en ese momento, tan fenomenal éxito podría haber sido razón suficiente para un premio Nobel. Sin embargo, tras aquel episodio, nadie estará satisfecho hasta que se detecten (o se descarten) los modos B primordiales.

EL PROBLEMA DE LA MITOMANÍA

La necesidad de encontrar héroes y figuras a las que admirar y a las que atribuir todo tipo de virtudes y protagonismos en la historia, la política, los negocios, el deporte o la ciencia forma parte de la naturaleza humana. No obstante, ningún hombre o mujer habría podido conseguir nunca nada sin el concurso de los muchos otros hombres y mujeres que los precedieron, enseñaron, inspiraron, ayudaron o trabajaron para ellos, o que simplemente forman parte de la organización social que hace posible esos logros.

En ninguna actividad humana es esto más cierto que en la ciencia. No es solo que estamos subidos a hombros de gigantes: es que miles de investigadores ponen cada día los ladrillos de un edificio que luego algunos tienen la suerte de culminar. Sin negar su genialidad, conviene no olvidar que la piedra angular que colocan se encuentra sostenida por muchas otras, sin las cuales ningún resultado tendría sentido. Además de que los equipos de investigación y las colaboraciones científicas se encuentran formados por cada vez más personas, el descubrimiento casi

simultáneo e independiente de un mismo fenómeno o ley es algo habitual en ciencia.

La información científica seria y completa debería tener en cuenta estos aspectos. Pero la tentación de mitificar a unos pocos es demasiado fuerte, puesto que resuena con el hambre de héroes, a menudo reforzado por un nacionalismo científico que se parece demasiado al futbolístico, y por la soberbia de los propios científicos. Cuesta mucho ver el nombre de Georges Lemaître acompañando al de Edwin Hubble cuando se habla de la expansión del universo. O los de Robert Brout y François Englert junto al de Peter Higgs cuando se menciona el mecanismo de generación de masa de las partículas elementales. Las razones por las que el nombre de Alfred Russel Wallace no acompaña al de Charles Darwin son más complejas. Y a menudo, el nombre omitido ha sido el de una mujer, como el de Jocelyn Bell frente a Antony Hewish en el descubrimiento de los púlsares.

Pero, sin duda, todos los mitos palidecen frente al de Albert Einstein, ante quien la prensa pierde cualquier tipo de objetividad. El titular «Einstein tenía razón» se ha venido repitiendo durante los últimos años para subrayar algunos éxitos de la teoría de la relatividad general en los cuales el propio Einstein y otros eminentes científicos de la época, como Arthur Eddington, no creían. La existencia de los agujeros negros o las ondas gravitatorias constituyen dos buenos ejemplos de predicciones que el propio Einstein no quiso aceptar.

La creación de mitos y la práctica según la cual «el ganador se lo lleva todo» es, además de injusta y desincentivadora para los jóvenes investigadores, peligrosa. En el caso de la imagen del EHT, la atribución por parte de la prensa anglosajona de un papel singular a la científica computacional Katie Bouman y el injusto acoso al que ello dio lugar (en gran medida, por ser mujer) ejemplifica algunas de las consecuencias negativas de la mitificación involuntaria de solo una de las muchas personas que participaron en aquel hito científico.

¿CÓMO PROCEDER?

¿Qué hacer ante las informaciones erróneas? ¿Quién puede o debe denunciarlas? ¿A quién acudir para asesorarse y encontrar las respuestas correctas? Estas son preguntas de difícil respuesta. Algunos medios han creado gabinetes para luchar contra los bulos y las falsedades en los discursos políticos. También hay portales especializados en la denuncia de bulos sobre cuestiones especialmente delicadas, como la inmigración o las vacunas. Pero hay que reconocer que el impacto de estas iniciativas entre los más afectados por las desinformación es muy escaso, ya que no penetran en sus burbujas informativas.

Esto no quiere decir que haya que dejar de denunciar la desinformación. Pero sí indica que aún no se ha encontrado un mecanismo compatible con la libertad de expresión e información (irrenunciables) para combatir de manera eficiente estos problemas. La situación se agrava cuando quienes difunden errores o incluso bulos resultan ser científicos, algo más común de lo que cabría pensar. En tal caso, solo queda acudir a «autoridades científicas»: especialistas cuyo alto nivel haya quedado reflejado en sus logros reconocidos por la comunidad científica. Son ellos quienes pueden expresarse como líderes de su comunidad y contrarrestar las informaciones erróneas.

Sin embargo, en los países donde la comunidad científica es relativamente joven, como España, y donde la mayoría de los campos de investigación carecen de líderes reconocidos por el público, resulta mucho más difícil luchar contra la desinformación (como lo es luchar por medidas políticas con mayor base científica). La falta de referentes claros hace que, a menudo, los medios, el público y los responsables políticos acudan al mismo científico conocido una y otra vez para asesorarse sobre cuestiones que poco tienen que ver con su especialidad, con resultados predecibles: falta de rigor, inexactitudes o simplificaciones desmesuradas. Por otra parte, en algunos países con tradiciones científicas sólidas se ha extendido la descalificación global hacia «los expertos» y «las élites», y la situación, siendo inicialmente mucho mejor, se ha tornado bastante menos que ideal para combatir la desinformación.

Llegados aquí, es momento de preguntarse qué podemos hacer para solucionar los problemas que aquejan a la divulgación científica actual. Más allá de la actitud que, a título individual, pueda tomar cada investigador en pro del rigor de la información científica, creemos necesario un compromiso por parte de la comunidad de divulgadores y periodistas. En nuestra opinión, dicho compromiso podría tomar la forma de un código de buenas prácticas como el decálogo que nos atrevemos a proponer aquí (*véase el recuadro* «¿Cómo mejorar la divulgación científica?»). Este traslada al ámbito de la divulgación científica y al contexto comunicativo actual algunos de los códigos del periodismo clásico.

Estas recomendaciones inciden en la actitud de los comunicadores científicos frente a su público y frente a toda la sociedad. Con todo, es justo reconocer que también el público y los propios científicos tenemos nuestra parte de responsabilidad. Con independencia de nuestros conocimientos, todos deberíamos buscar otras fuentes de información científica, comparar y juzgar por nosotros mismos, como ocurre con la información general. Las redes sociales no solo facilitan la propagación de bulos, sino que también posibilitan su crítica, su refutación y el cuestionamiento de quienes los propagan. Esta responsabilidad en la lucha por la verdad científica —una verdad necesariamente provisional y fruto de la crítica, el debate y el consenso— es de todos. IyC

PARA SABER MÁS

On the role of analogies and metaphors in learning science. Reinders Duit en *Science Education*, vol. 75, págs. 649-672, noviembre de 1991.
New media landscapes and the science information consumer. Dominique Brossard en «The science of science communication», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, suplemento 3, agosto de 2013.
Gap between science and media revisited: Scientists as public communicators. Hans Peter Peters en «The science of science communication», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, suplemento 3, agosto de 2013.
5 analogías de física, desmitificadas. Ángel Uranga, octubre de 2019. www.youtube.com/watch?app=desktop&v=P7pmvGDNYAU
'Infodemia', la peste informativa del siglo XXI. Raquel Pérez Gómez et al. en eldiario.es, 23 de septiembre de 2020. www.eldiario.es/cienciacritica/infodemia-peste-informativa-siglo-XXI_132_6235864.html

EN NUESTRO ARCHIVO

Ciencia y medios: ¿círculo vicioso o virtuoso? Michele Catanzaro en *IyC*, diciembre de 2016.
Einstein y la prensa: una relación tumultuosa. Jean-Marc Ginoux y Christian Gérini en *IyC*, diciembre de 2016.
Mecánica cuántica: interpretación y divulgación. Adán Sus en *IyC*, julio de 2017.


adidas
SOUTH AFRICA
TOYOTA
SEMENYA
BEIJING 201

LA MEDALLISTA DE ORO OLÍMPICA Mokgadi Caster Semenya corre en una serie de los 800 metros del Campeonato Mundial de Atletismo en representación de Sudáfrica. Puede que no vuelva a participar en esta disciplina.

DEPORTE

Cuestión de testosterona

Algunas atletas son discriminadas por presentar altos niveles de esta hormona

Grace Huckins



EN SÍNTESIS

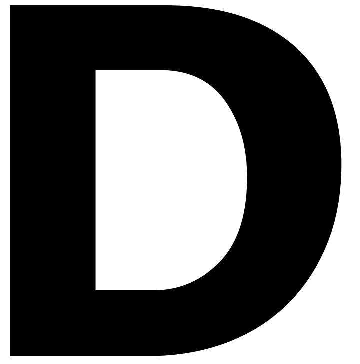
La intersexualidad difumina el límite entre los dos sexos canónicos y plantea problemas en el deporte profesional a la hora de clasificar a los y las deportistas.

Las deportistas intersexuales portadoras de cromosomas XY y afectadas por hiperandrogenismo, que provoca la secreción de altos niveles de testosterona, pueden ser vetadas en las competiciones femeninas por esa circunstancia.

¿Debe ser la secreción natural de testosterona un factor descalificador y no otros dones como la gran estatura o la tolerancia excepcional al metabolismo anaerobio? El debate está servido.



Grace Huckins cursa el doctorado de neurociencia en la Universidad Stanford y es máster en neurociencia y estudios de la mujer por la Universidad de Oxford.



DUTEE CHAND SE CONVIRTIÓ EN LA MEJOR VELOCISTA DE LA INDIA EN FEBRERO de 2016. El tiempo que marcó en pista cubierta durante una serie clasificatoria celebrada en Catar sigue siendo el más rápido que ha conseguido jamás una india en los 60 metros lisos y no tardó en ser la primera atleta de su país en décadas que competía en los 100 metros lisos en unas Olimpiadas. Nadie diría que un año antes estuvo a punto de no volver a participar en una competición oficial. En 2014, cuando ya despuntaba a nivel mundial en la categoría junior, la Federación India de Atletismo (AFI), con el beneplácito de la Federación Internacional, le prohibió participar en las competiciones femeninas debido a los niveles inusualmente altos de testosterona que su cuerpo segregaba de forma natural. (No hay pruebas de que Chand tomara sustancias prohibidas para alterar sus niveles hormonales.)

Según la AFI, que es quien regula las competiciones de atletismo en la India, sus niveles de testosterona por encima de la media le conferían una ventaja física que la igualaba a los atletas masculinos. Chand recurrió la decisión, negando que el hiperandrogenismo (secreción elevada de andrógenos, la clase de hormonas a la que pertenece la testosterona) le hiciera más semejante a un colega que a una colega velocista y, en 2015, el Tribunal de Arbitraje Deportivo le dio la razón. Resolvió que la Federación Internacional de Atletismo, la encargada de fijar las reglas en las competiciones internacionales de este deporte, no había presentado suficientes pruebas científicas que apoyaran sus afirmaciones, por lo que Chand podía volver a competir.

Pero en este momento la Federación sostiene que ya cuenta con una base científica que justifica la prohibición de que las corredoras con niveles altos de testosterona compitan en las distancias que van de los 400 metros a una milla (1609 metros), a menos que se mediquen para reducirlos o acepten competir contra hombres. Este criterio no afecta a Chand, ya que compite en distancias más cortas, pero podría acabar con los sueños de Mokgadi Caster Semenya, medallista de oro olímpica y heroína en su país natal, Sudáfrica. El Tribunal de Arbitraje Deportivo aceptó en 2019 el argumento de la Federación Internacional de Atletismo y el Tribunal Supremo de Suiza refrendó esta decisión en septiembre de 2020. En lugar de someterse a un innecesario tratamiento farmacológico para rebajar la testosterona, Semenya ha decidido que en los Juegos Olímpicos de Tokio 2021 competirá solo en los 200 metros, carrera en que no se imponen límites a la hormona. Esta serie de decisiones controvertidas ha generado un debate sobre la imparcialidad y la discriminación en el deporte. A lo largo de la historia moderna de las Olimpiadas, las reglas sobre quién cuenta como mujer han cambiado a medida que ha ido progresando el conocimiento que la ciencia tiene sobre el sexo. Una de las últimas formas legales de discriminación en el deporte consiste en vetar la participación de las mujeres según los niveles naturales de testosterona.

Como estudiante interdisciplinar versada en biología y en estudios de género he analizado el modo en que los científicos intentan convertir categorías sociales como «mujer» y «hombre» en verdades fundamentales. Desde que la ciencia se empeña en descubrir la base biológica del sexo y el género, la naturaleza ha demostrado de forma reiterada que no se amolda a las teorías postuladas. (El «sexo» designa las características biológicas; el «género», los roles sociales y la identificación.)

La mayoría de los hombres posee un par de cromosomas XY y desarrolla en el útero testículos, que más adelante secretarán en la sangre notables cantidades de testosterona. En cambio, la mayoría de las mujeres posee un par de cromosomas XX, lo que impulsa la formación de los ovarios y explica sus bajos niveles de testosterona. Ahora bien, algunas poseen cromosomas XY y una anatomía externa femenina; son las que sufren la política de la Federación Internacional de Atletismo. Esos atributos que reflejan una variación que trasciende el concepto binario de hombre y mujer son conocidos como rasgos intersexuales.

Según interAct, una organización de defensa de la intersexualidad, es posible que el 1,7 por ciento de la humanidad sea intersexual, aunque muchas personas nunca se darán cuenta. Y puede que su representación en el mundo del deporte de élite supere ese porcentaje: en el dictamen que hizo público el Tribunal de Arbitraje Deportivo se cita repetidamente la estadística que dice que las mujeres con cromosomas XY son mucho más comunes entre las deportistas de élite que en la población general.

Parece posible, pues, que las mujeres intersexuales gocen de cierta ventaja en las competiciones de atletismo. Pero eso también ocurre en los deportistas dotados de ventajas naturales, como la estatura en el baloncesto. La cuestión clave no es si algunos rasgos sexuales confieren ventajas deportivas, sino si esas ventajas son tan notables e incuestionables que las deportistas como Semenya no deberían competir con otras mujeres.

CROMOSOMAS Y HORMONAS

El sexo nunca ha sido una cuestión meramente binaria, pero los órganos reguladores de los Juegos Olímpicos llevan décadas aplicando reglas demasiado simplistas a esta realidad compleja. Entre las décadas de 1960 y 1990, docenas de mujeres fueron señaladas e incluso descalificadas por su dotación cromosómica. La primera fue Ewa Klobukowska, a quien se le impidió competir en las Olimpiadas de 1968 por su cariotipo XY, pese a ser considerada mujer en un examen genital practicado en

PÁGINAS PRECEDENTES: OLIVIER MORIN/AFP A TRAVÉS DE GETTY IMAGES

1966. Su historia no es tan sorprendente: algunas mujeres intersexuales son anatómicamente tan parecidas a otras mujeres que ignoran poseer un par de cromosomas XY.

Por lo tanto, los análisis cromosómicos descalifican a ciertas personas cuyos rasgos son netamente femeninos pero no poseen los cromosomas XX. Esta contradicción, a la que hay que añadir el carácter invasivo de algunas pruebas y las funestas consecuencias sociales que acarrean a quienes no las superan, condujo finalmente al Comité Olímpico Internacional a poner fin a las pruebas de determinación del sexo en la década de 1990. Aún así, como su preocupación por asegurar la equidad en las competiciones femeninas no ha cesado, se reserva el derecho de practicarlas a ciertas personas. Los casos recientes de pruebas de determinación del sexo no se han centrado en el cariotipo, sino en un aspecto del sexo que aparentemente está más relacionado con la capacidad atlética: los niveles de testosterona.

Los deportistas llevan recurriendo a la testosterona sintética desde al menos la década de 1950 con el afán de mejorar su rendimiento, pero hasta la década de 1990 la comunidad médica no contó con datos científicos solventes que vinculasen su toma con la capacidad atlética. Este hecho pudo influir en la decisión del Comité Olímpico Internacional de no usar los niveles de testosterona durante la etapa en la que le preocupaba la verificación del sexo. El paradigma cambió a partir de 1996, cuando un estudio demostró que, sumados a un entrenamiento de musculación, los suplementos de testosterona podían aumentar tanto la masa como la fuerza muscular en el varón.



DUTEE CHAND (*derecha*) corre en los 200 metros femeninos en los Juegos Asiáticos de 2018. Años antes a esta velocista india se le había prohibido competir en carreras oficiales.

Desde entonces los endocrinólogos han ampliado enormemente su comprensión sobre la relación entre la testosterona y la masa muscular. Las pruebas demuestran que esta hormona incrementa el número de células musculares al tiempo que aumenta el tamaño de los músculos. Existen indicios de que la testosterona también puede influir en la capacidad atlética mediante otros mecanismos. En un experimento, los hombres que habían recibido niveles altos de testosterona (en contraposición a los que recibieron niveles más bajos) presentaban concentraciones más altas de hemoglobina en la sangre, lo que aumentaba su capacidad de transporte de oxígeno al resto del cuerpo. La testosterona también podría influir en la masa ósea, puesto que su escasez aparece vinculada con la osteoporosis, como ocurre en parte con la escasez de estrógenos, y ambas hormonas desempeñan una función importante en el mantenimiento de la estructura ósea.

Y es que, de hecho, los andrógenos (hormonas «masculinas», entre ellas la testosterona) y los estrógenos (hormonas «femeninas») están mucho más relacionados de lo que la mayoría de la gente cree. Para empezar, todo el mundo produce ambos de forma natural. Y todos los estrógenos fueron antes testosterona, transformada en ellos por la enzima aromatasa. Los científicos debaten cuánta cantidad de una hormona es «normal» y cómo se deberían medir esos niveles: en el tema que nos ocupa, un estudio reciente concluyó que los niveles «normales» de testosterona en la mujer se deberían ajustar para dar mejor cabida a las deportistas. Y en cuanto a los niveles de estrógenos, tanto de los hombres como de las mujeres, en realidad pueden superponerse, sobre todo durante ciertas fases del ciclo menstrual. En cambio, los niveles de testosterona varían considerablemente entre unos y otras; en el varón joven tienden a estar entre los 10 y los 40 nanomoles por litro de sangre, mientras que en la mujer tienden a situarse entre 0,5 y 3 nmol/l.

A la vista de los datos, esto es, la diferencia que en general presentan hombres y mujeres en los niveles de testosterona, el vínculo probado entre el dopaje con esta hormona y el aumento de la masa muscular y la ventaja cercana al 10 por ciento que los atletas de élite tienen sobre sus colegas femeninas en las competiciones, parece lógico pensar que una mujer con niveles altos de testosterona correrá como un hombre. Sin embargo, en el caso de Chand, el Tribunal de Arbitraje dictaminó que no se le podía prohibir competir porque no existía todavía una prueba clara de que el nivel natural de testosterona guardase relación con la capacidad atlética en las deportistas de primer nivel.

Cuatro años después, el tribunal se pronunció de forma distinta en el caso de Semenya, en parte porque creyó que ya contaba con pruebas. Stéphane Bermon, director del equipo científico de la Federación Internacional de Atletismo, había publicado poco antes un artículo en el que analizaba los datos de dos competiciones internacionales y exponía que las atletas con niveles altos de testosterona obtenían mejores resultados, por término medio, que las que tenían niveles bajos. Puesto que el estudio se basa en datos reales de corredoras de élite, se puede afirmar que sus conclusiones son las más relevantes hasta la fecha en la controversia del hiperandrogenismo.

Como investigadora he dedicado buena parte de mi tiempo a rebuscar en la bibliografía casos de investigadores que cometan errores estadísticos, especialmente cuando sus estudios versan sobre colectivos minoritarios. Por ello me sentí intrigada al leer que un grupo de científicos había puesto en duda la validez del estudio anterior, a causa de problemas con los datos. Como répli-

JEWEL SAMAD/AFP A TRAVÉS DE GETTY IMAGES

ca a las objeciones, Bermon actualizó el estudio y, si bien siguió observando algunos efectos, su conclusión se vio notablemente socavada por la corrección. Los efectos se esfumaron cuando aplicó a los resultados un proceso estadístico llamado «correcciones para comparaciones múltiples», que tiene en cuenta el aumento de la probabilidad de obtener al menos un falso positivo cuando se hacen muchas pruebas estadísticas en lugar de una sola.

Este contratiempo no descarta que la testosterona esté relacionada con el rendimiento de las atletas, pero habrá que ahondar mucho en la cuestión para llegar a una conclusión firme.

HORMONAS Y RENDIMIENTO ATLÉTICO

Si la testosterona que se toma ilegalmente y la producida de forma natural por el cuerpo causan los mismos efectos en cualquier persona, podríamos suponer que los niveles que suele alcanzar en los hombres les confieren forzosamente una ventaja atlética. Pero para comprender qué significan esos estudios para mujeres como Semenya, debemos saber cómo funciona su cuerpo. Todas las deportistas que han sido objeto de la política de la Federación Internacional de Atletismo por sus niveles de testosterona son intersexuales, con un conjunto similar de rasgos sexuales: poseen un par de cromosomas XY, pero su cuerpo no responde a los andrógenos de igual forma que la mayoría de los individuos XY. Dada la complejidad inherente que reviste el sistema endocrino, resulta sumamente difícil determinar el efecto preciso que la testosterona tiene en estas personas intersexuales.

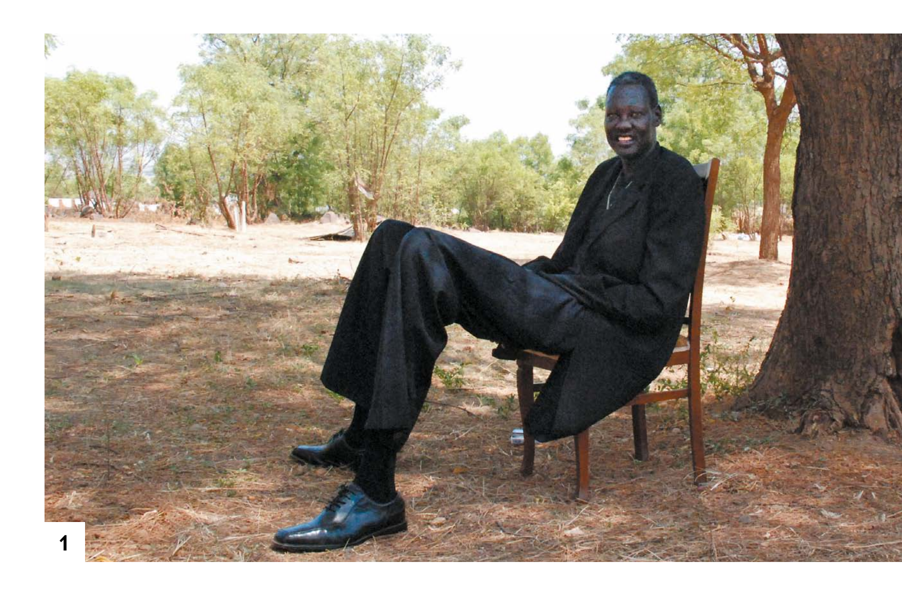
Aunque el efecto que en ellas causan los andrógenos fuese el habitual, el vínculo entre la testosterona y la capacidad atlética seguiría siendo mucho más débil de lo que podría parecer. Tomar testosterona puede hacer que los músculos aumenten de tamaño, pero eso no implica que alguien cuyos niveles de testosterona sean altos de forma natural vaya a ser mejor deportista que otra persona cuyos niveles sean más bajos. La misma versión original y controvertida del estudio de Bermon apunta a matices en esa conexión: si bien la testosterona mostró un efecto positivo en la capacidad atlética de las participantes en un par de competiciones, en otras 16 no se observó efecto alguno e incluso los datos de varias competiciones indicaron que los niveles altos podían asociarse con un rendimiento peor.

En un estudio con atletas suecos de élite no se halló relación entre la testosterona y el rendimiento deportivo, en tanto que en otro reciente con atletas adolescentes en Australia mostró una fuerte correlación negativa entre los niveles de la hormona en las mujeres y su rendimiento. Los hombres tampoco obtienen necesariamente una ventaja abultada por gozar de valores altos: casi el 17 por ciento de los atletas de alto nivel que participaron en un estudio tenían niveles de testosterona por debajo del intervalo habitual y casi el 10 por ciento tenía valores inferiores a 5 nmol/l.

El claro efecto que los suplementos de testosterona ejerce en el cuerpo y las diferencias promedio en la masa muscular entre hombres y mujeres nos pueden hacer creer que los altos niveles de la hormona confieren automáticamente una capacidad atlética superior, sean cuales sean los demás factores. Pero la ciencia demuestra que, al menos en los deportistas de élite, el vínculo entre la testosterona y el rendimiento dista de ser sencillo.

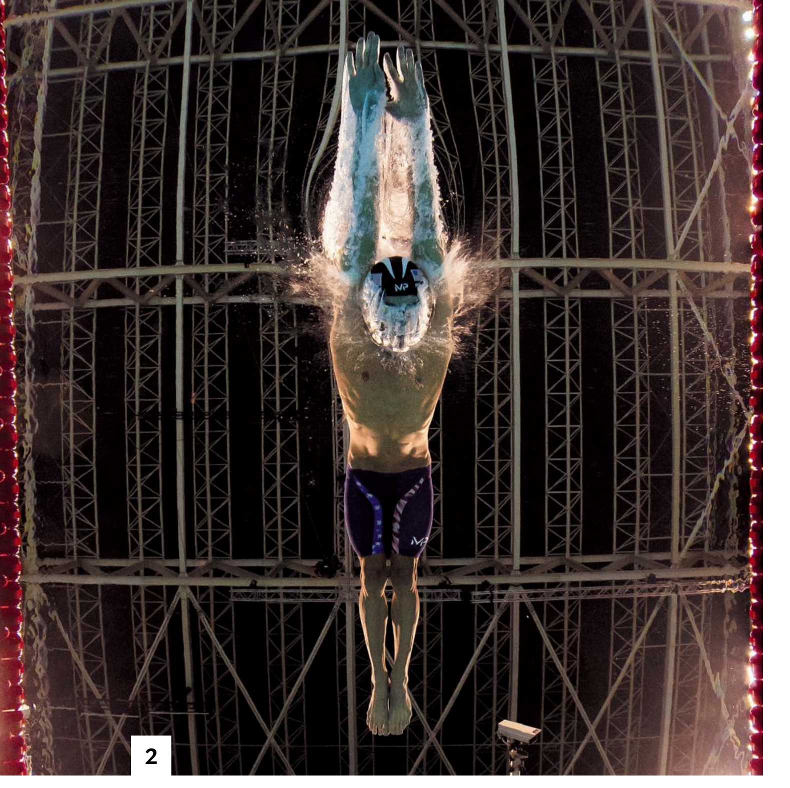
Una de las primeras cosas que aprende cualquiera que estudia la ciencia del sexo y el género es lo difícil que resulta desenmarañar las influencias biológicas y sociales. En mi caso vi clara esta cuestión al investigar las aparentes ventajas ligadas al sexo en aspectos como la habilidad espacial. Como los hombres suelen secretar más testosterona y reciben más estímulo para estudiar carreras científicas o técnicas que las mujeres, resulta difícil saber si tales diferencias obedecen a factores biológicos o sociales. Así que, para discernir entre las causas biológicas y sociales, se estudia el comportamiento de personas con niveles altos de testosterona que no están inmersas en un ambiente social masculino, es decir, mujeres con rasgos intersexuales.

La historia no solo se complica cuando intentamos distinguir entre las causas biológicas y sociales, sino cuando se intenta desentrañar la interrelación entre ambos tipos de factores. Un ejemplo fascinante nos lo aporta el trabajo de la neurocientífica Melissa Hines, quien estudió niñas con hiperplasia suprarrenal congénita, un trastorno que genera rasgos intersexuales en niñas XX debido a los niveles inusualmente


1

altos de andrógenos. Hines demostró que, a semejanza de los niños, estas niñas suelen preferir los juegos más activos. Ahora bien, en fechas más recientes demostró que las niñas no prefieren necesariamente ese tipo de juegos en lugar de las muñecas: simplemente no les importa lo que hagan las demás. La mayoría preferirá jugar con una pelota roja en lugar de con una azul si ven que las demás están jugando con pelotas rojas, pero las hiperplásicas jugarán felizmente con cualquier juguete. La testosterona no hace que prefieran pelear antes que leer; simplemente cambia el modo en que responden a las señales sociales vinculadas con el género.

En suma, los efectos de la testosterona sobre el comportamiento resultan ser bastante complejos, pues parece actuar en conjunción con señales sociales, de manera que ningún factor puede ser aislado del otro. Quizás estas observaciones aparentemente psicológicas puedan parecer irrelevantes para la cuestión de la capacidad atlética, pero incluso Bermon y sus colaboradores han sugerido que la dominancia y la agresividad, largo tiempo asociadas con los niveles de testosterona, podrían desempeñar un papel a la hora de ganar una carrera. En uno



2

ATRIBUTOS INUSUALES como los 2,30 metros del baloncestista Manute Bol (*1*) y la resistencia a la fatiga muscular del nadador Michael Phelps (*2*) no suelen suponer la descalificación de los deportistas en las competiciones.

de los pocos estudios en que se ha examinado rigurosamente el efecto de la testosterona sintética sobre la capacidad física femenina, aquellas mujeres que la tomaban en gran cantidad experimentaron un pequeño incremento de su masa muscular pero un aumento enorme de la fuerza. Los autores plantearon la hipótesis de que algún factor psicológico que no habían estudiado permitía que ese leve desarrollo muscular propiciase tan extraordinario beneficio atlético.

Pero también sería simplista suponer que la testosterona causa agresividad o competitividad, aunque las mujeres puedan ser más propensas a entrar en situaciones competitivas cuando sus niveles de testosterona son más altos, y los hombres que responden más intensamente a los andrógenos puedan confiar más en sus posibilidades de ganar. De hecho, numerosos estudios han demostrado que los niveles de testosterona aumentan después, no antes, de ganar una competición o de demostrar su dominio de otro modo, y un estudio de 2015 sugirió que este efecto podría ser más fuerte en la mujer que en el hombre. El comportamiento repercute en las hormonas y sabemos que en él influyen las normas sociales que afectan a hombres y mujeres, lo cual demuestra una vez más lo intrincados y tal vez lo inextricables que pueden ser los vínculos entre lo social y lo biológico.

Cuando los críticos argumentan que las mujeres intersexuales son básicamente «hombres biológicos» casualmente dotados de clítoris y labios vaginales, están obviando por completo la enorme influencia que las categorías «hombre» y «mujer» ejercen en todos los aspectos de nuestra vida y en todo nuestro cuerpo. La testosterona no es ninguna entidad misteriosa llegada de la nada para influir profundamente en el cuerpo y la mente: cambia y es cambiada por las normas de género.

Pese a ser un elemento más de una intrincada y a veces circular red de factores que contribuyen a la capacidad atlética, es improbable que la testosterona sea del todo irrelevante. De una u otra forma, parece que las mujeres XY tienen más posibilidades de lograr hazañas físicas que las XX. Sin embargo, ello no implica que las intersexuales tengan que competir forzosamente con hombres en las categorías masculinas, ante los que con casi total seguridad perderían. Si argumentamos que la biología nos dice que hemos de separar a los atletas en virtud del umbral de 5 nanomoles de testosterona por litro de sangre, tal como ha hecho la Federación Internacional de Atletismo, estamos asumiendo que ese valor separa a los seres humanos en los dos grupos competitivos más imparciales y equitativos posibles.

Como la testosterona afecta a la capacidad atlética de una forma compleja y no lineal, esta sugerencia no se ve respaldada por las pruebas. Sería mucho más sensato separar el baloncesto en dos divisiones según la estatura: ningún jugador de la NBA mide menos de 1,75 metros, pero tanto los hombres como las mujeres con niveles bajos de testosterona pueden ser grandes atletas. Tampoco hay razones de peso para asegurar que la condición intersexual confiera ventajas genéticas únicas en disciplinas como las del atletismo profesional, donde toda una variedad de rasgos conduce al triunfo. ¿Por qué la baja producción de ácido láctico (que reduce la fatiga muscular) del nadador Michael Phelps o la estatura extraordinaria del añorado baloncestista Manute Bol merecen ser premiadas y, en cambio, el nivel relativamente alto de testosterona de Semenya la descalifica?

Si la biología no nos dota con una base firme para dividir a los deportistas en dos categorías, deberíamos preguntarnos por qué tenemos competiciones masculinas y femeninas. Tal vez el nivel de testosterona no separe claramente a la humanidad en deportistas mejores y peores, pero sí es cierto que en el deporte de élite el hombre supera a la mujer en disciplinas como el atletismo. Hacer mixtos los deportes y así excluir de facto a la mujer de las carreras olímpicas no sería intrínsecamente injusto (al fin y al cabo son muchos los colectivos que solo pueden soñar con ser corredores de élite, como las personas cardiópatas), pero sería desafortunado, pues perderíamos a destacadas deportistas que son referentes para multitud de jóvenes mujeres.

La biología es una herramienta demasiado limitada para decirnos cómo dividir el campo del atletismo, pero ayuda a entender mejor la diversidad humana. En un ámbito tan enrevesado y controvertido como el sexo y el género, la ciencia a menudo ofrece más ambigüedad que claridad. Y si no aporta claridad sobre el tema de las mujeres intersexuales en el deporte, siempre podremos volver a los valores de diversidad, inclusión y aceptación que convierten el deporte femenino de alto nivel en algo tan extraordinario.

PARA SABER MÁS

Natural selection for genetic variants in sport: the role of Y chromosome genes in elite female athletes with 46,XY DSD. Malcolm A. Ferguson-Smith y L. Dawn Bavington en *Sports Medicine*, vol. 44, págs. 1629-1634, 2014.

Participation of intersex athletes in women's sports. Women's Sports Foundation.

EN NUESTRO ARCHIVO

La historia de la testosterona sintética. John M. Hoberman y Charles E. Yesalis en *IyC*, abril de 1995.

Bioquímica del rendimiento atlético. Jesper L. Andersen, Peter Schjerling y Bengt Saltin en *IyC*, noviembre de 2000.

Más allá de XX y XY. Amanda Montañez en *IyC*, noviembre de 2017.

por Doris Elín Urrutia

Ángeles y mariposas de mar, bioindicadores de la acidificación

Estos diminutos moluscos, de fino caparazón calcáreo, son especialmente vulnerables a la acidificación oceánica derivada del cambio climático

Ciertos habitantes alados de los océanos, unas pequeñas babosas marinas del plancton denominadas ángeles y mariposas de mar, podrían convertirse en los «canarios de las minas de carbón» que nos avisen de la acidificación de las aguas provocada por el calentamiento global.

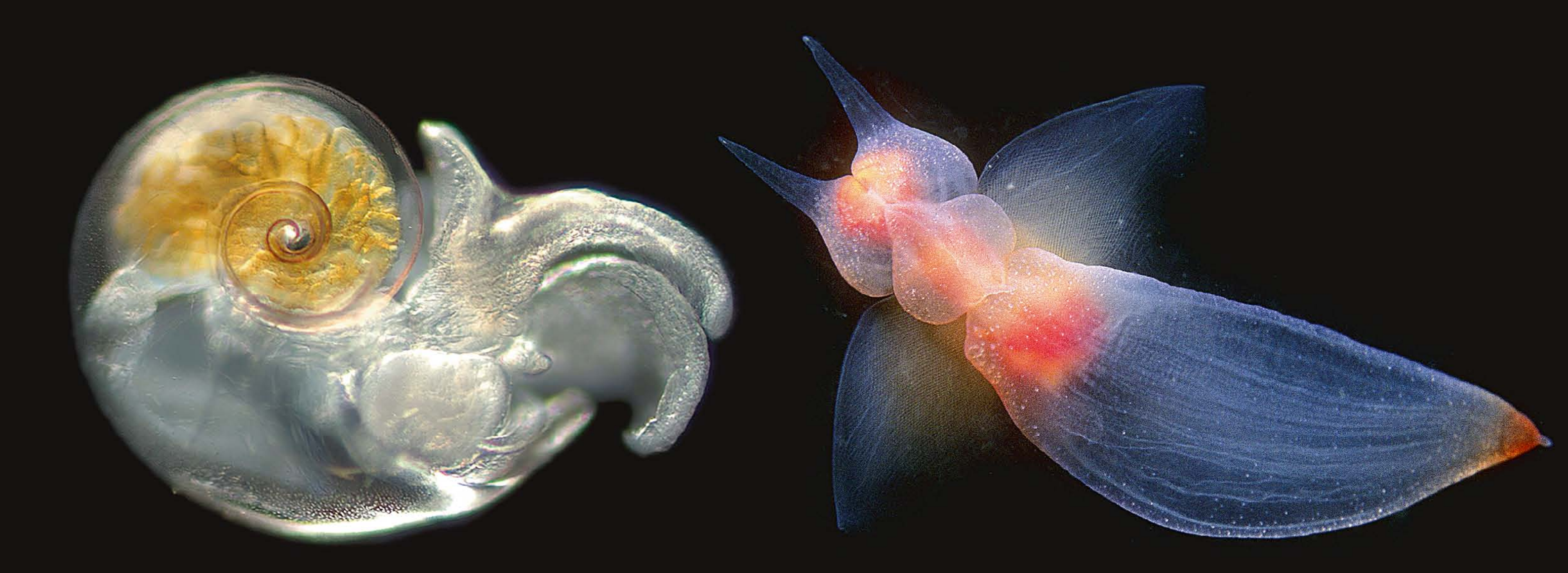
Los ángeles de mar (*Gymnosomata*) y sus ondulantes parientes, las mariposas de mar (*Thecosomata*) son moluscos terópodos. Surgieron en el Cretácico inferior, así que en sus inicios fueron coetáneos a los dinosaurios y los amonites. Destacan por su antigüedad y su notable resiliencia, pues han sobrevivido a extinciones y cambios ambientales de magnitudes planetarias. Son, además, los únicos seres vivos de su tipo que cuentan con un registro fósil robusto, de modo que ostentan una posición única para desvelar los efectos del cambio climático en el medio marino. Así lo apuntan Katja Peijnenburg, de la Universidad de Ámsterdam, y sus colaboradores en un estudio publicado el pasado octubre en *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

El calentamiento global se está acelerando y causa nuevos problemas a estos moluscos. A medida que las concentraciones de dióxido de carbono aumentan en el océano y las aguas se acidifican, los ecosistemas marinos sufren daños cada vez mayores, como la pérdida de biodiversidad en los arrecifes coralinos y la alteración del metabolismo corporal de sus moradores. Los cambios en el estado de salud de la fauna submarina, de la que forman parte estos pequeños moluscos, indican la creciente inestabilidad del ambiente marino. Debido a sus finos caparazones calcáreos, son especialmente vulnerables a la acidificación, por lo que podrían utilizarse como indicadores tempranos de esta perturbación y de la amenaza para la vida oceánica.

«Si bien nuestros resultados indican que en el pasado estos organismos lograron resistir episodios de acidificación marina, es improbable que en toda su historia evolutiva hayan afrontado jamás un cambio global de la magnitud y la velocidad del que presenciamos en la actualidad», concluyen los autores en su artículo.

—Doris Elín Urrutia
es periodista científica

CORTESÍA DE KATJA PEIJNENBURG Y ERICA GOETZE



LOS TERÓPODOS se dividen en dos grandes grupos: las mariposas de mar, con caparazón (*izquierda*), y los ángeles de mar (*derecha*), que pierden el caparazón al llegar a la edad adulta. Estas criaturas, que viven en mar abierto, han transformado su pie muscular en dos estructuras parecidas a alas, que utilizan para desplazarse a través del agua. Mientras que las mariposas se alimentan de plancton microscópico, que atrapan mediante una red mucosa, los ángeles son carnívoros y se alimentan exclusivamente de las mariposas de mar.



LOS ÁNGELES Y LAS MARIPOSAS DE MAR presentan una gran variedad de formas y tamaños (entre pocos milímetros y varios centímetros). Son un componente habitual del zooplancton en todo el mundo y contribuyen en gran medida a los flujos de carbono en el océano abierto. Aquí se muestran, a distinta escala, cinco especies de mariposas (*1, 2, 3, 5 y 6*) y dos de ángeles (*4* y *7*).

KATJA PEIJNENBURG, ERICA GOETZE, DEBORAH WALL-PALMER, LISETTE MEKKES (*1, 2, 3, 5 y 6*); NOAA (*4*); GETTY IMAGES/RLSPHOTO/ISTOCK (*7*)

por Miquel Carandell Baruzzi

Miquel Carandell Baruzzi es historiador de la ciencia. Trabaja en el Museo de Ciencias Naturales de Granollers y en la Universidad Autónoma de Barcelona.



La controversia del Hombre de Orce

Política y públicos en la búsqueda de los orígenes de la humanidad

En junio de 1984, la portada del número 525 de la revista satírica *El Papus* mostraba la caricatura de un hombre-burro con un tatuaje de «I love Fraga» y el titular «El misterio del Hombre de Orce». *El Papus* era un referente de la actualidad política crítica con el franquismo; tan irreverente que, en septiembre de 1977, sufrió un atentado del terrorismo fascista que acabó con un muerto. Pero ¿qué era el Hombre de Orce? ¿Y por qué era objeto de sátira en la revista?

Descubrimiento

La historia del Hombre de Orce se remonta al verano de 1982. Josep Gibert, Jordi Agustí y Salvador Moyà Solà, investigadores vinculados al Instituto de Paleontología fundado por Miquel Crusafont en Sabadell (Barcelona), dirigían una excavación en el yacimiento de Venta Micena, en Orce, un pequeño pueblo de Granada. Albergaban la esperanza de encontrar restos de los primeros humanos que llegaron a Europa. El mismo objetivo que perseguían otros científicos, como el matrimonio formado por los paleontólogos Henry y Marie Antoinette de Lumley, foco de atención científica y mediática gracias a sus hallazgos en el yacimiento de Tautavel, en el sur de Francia.

Ese verano se produjo en Orce un hallazgo histórico. Los investigadores descubrieron un fragmento de hueso que, pese a mantener parte de su cara interior adherida a una roca, presentaba una serie de características, especialmente su curvatura y grosor, que sugerían que se trataba de un cráneo humano. ¿Podía tratarse del resto más antiguo de un antepasado del hombre encontrado en Europa? Los paleontólogos de Sabadell no contaban con la suficiente estabilidad económica para desarrollar sus investigaciones, por lo que decidieron mostrar el fragmento a los responsables de la Diputación de Barcelona, de la que dependía el Instituto de Paleontología de Sabadell.

Cabe recordar que la Transición se encontraba en una fase clave. En octubre de 1982, Felipe González y el Partido Socialista Obrero Español iban a ganar las elecciones generales, y en mayo de 1983 las elecciones municipales darían al PSC-PSOE la presidencia de la Diputación, que de hecho ya ostentaban desde 1980. Algunas de las competencias de la Diputación estaban siendo transferidas a la recién reinstaurada Generalidad de Catalunya, presidida por Convergència i Unió, y al partido socialista le convenía mostrar públicamente el papel de la Diputación, a fin de preservar la institución manteniendo sus competencias. Los responsables políticos de la Diputación reaccionaron eufóricamente cuando los científicos les mostraron el fragmento de hueso.

LA SÁTIRA de la portada de *El Papus* muestra hasta qué punto era conocido el Hombre de Orce por el público español.

EL PAPUS

Proyección mediática

Tras presentar el descubrimiento en la revista científica del Instituto, se organizó, en colaboración con la Junta de Andalucía, también en manos del PSOE, una multitudinaria rueda de prensa en Granada, y se firmó un convenio que garantizaba los fondos para la investigación. También se celebraron sendas ruedas de prensa en Orce y Sabadell. La difusión mediática del hallazgo coincidió con la visita al yacimiento de los Lumley, quienes, tras examinar el fragmento óseo, acordaron colaborar en el proyecto. El respaldo internacional era de suma importancia para el estudio de lo que empezaba a denominarse el Hombre de Orce.

En los meses siguientes, el descubrimiento mereció los elogios de la comunidad científica. Sus protagonistas se convirtieron en personajes conocidos, apareciendo en televisión, dando charlas para todos los públicos y escribiendo para revistas y periódicos. Los investigadores usaron la exposición mediática para presentar nuevas pruebas en torno a Venta Micena, que, de este modo, se convirtió antes en un asentamiento prehistórico en los medios de comunicación que en congresos y publicaciones científicas. El conocimiento científico se elaboraba tanto en las excavaciones como en la prensa.

Para avanzar en las investigaciones era necesario separar la roca que impedía ver la parte interior del hueso. Era un pro-

ceso delicado y laborioso que se produjo en paralelo a la presentación mediática del yacimiento y a la formalización de los contratos para los investigadores del Instituto, que vio cómo se multiplicaba su presupuesto. A su vez, Antoni Dalmau, presidente de la Diputación, no dejó pasar ocasión de anunciar públicamente la aportación de la institución que presidía a los trabajos de Orce. El lanzamiento público del Hombre de Orce, pues, benefició tanto a científicos como a políticos, pero también a los medios de comunicación, ávidos de noticias espectaculares. La situación política y social de la Transición nos ayuda a entender la presencia mediática del Hombre de Orce, así como su historia científica.

Controversia pública

Sin embargo, en mayo de 1984 todo se torció. La limpieza de la parte interna del hueso reveló una pequeña cresta que habitualmente no presentan los antepasados del hombre y que, en cambio, es propia de los caballos. Solo ocasionalmente, sobre todo en los cráneos infantiles, la cresta se daba en homínidos, pero no era la norma. Ante la duda, y sin desvelar públicamente la cuestión, los investigadores de Orce acudieron a los Lumley. El veredicto de Marie Antoinette, experta en anatomía, no dejaba lugar a dudas: el cráneo no pertenecía a un antepasado del hombre, sino de los caballos.

Los Lumley presionaron a los investigadores de Orce para que admitieran su error en una rueda de prensa, pero Gibert creía que eran necesarios estudios ulteriores antes de descartar la adscripción humana y retractarse públicamente. Partieron de París sin haber alcanzado un acuerdo. A su llegada a Sabadell les esperaba una sorpresa. El Hombre de Orce era cuestionado en la portada de *El País*: «Serios indicios de que el cráneo del Hombre de Orce pertenece a un asno». La noticia la había filtrado la misma M. A. de Lumley «en conversación telefónica con este periódico».

Se desató entonces una agria controversia científica en los medios de comunicación. Gibert salió en defensa del Hombre de Orce, presentando a los medios nuevas investigaciones, mientras Agustí y Moyà permanecían al margen. La polémica recibió tanta atención como la que se había prestado al descubrimiento, y así el «Hombre de Orce» se convirtió en el «Burro de Orce». El impacto de la controversia en la cultura popular es evidente en la portada de *El Papus* que mencionamos al principio, o en la letra de la conocida canción *¿Quiénes somos? ¿De dónde venimos? ¿A dónde vamos?* del grupo gallego Siniestro Total, que se preguntaba «¿Es nuestro antepasado el Hombre de Orce?». Se vertieron asimismo numerosas críticas al uso político del cráneo de Orce, que se reveló como un hueso idóneo para la sátira política.

El lanzamiento público del Hombre de Orce benefició tanto a científicos como a políticos, pero también a los medios de comunicación, ávidos de noticias espectaculares

La comunidad científica criticó el empeño divulgativo y la capacidad científica y los métodos de Gibert. Cabe preguntarse, sin embargo, por qué los elogios se convirtieron en críticas, cuando la presencia pública del caso y la aparición de nuevas investigaciones en los medios generalistas eran las mismas tanto antes como después de la polémica. Tal vez las críticas respondían al hecho de que la controversia científica hubiera saltado a los medios de comunicación. Además, pese a las dudas de la comunidad científica, Gibert sostenía que el Hombre de Orce era un antepasado del hombre, manteniendo viva la polémica. Los científicos pueden discrepar, pero no conviene airear las diferencias en público.

La ciencia en una dimensión distinta

A finales de 1987, Agustí y Moyà reconocieron en un artículo científico que el Hombre de Orce era en realidad un antepasado del asno. Ambos lo habían anunciado previamente en los medios de comunicación, añadiendo que la discusión debería de haberse mantenido en los foros científicos, pero que «el tratamiento periodístico del tema» le había dado una «dimensión distinta». Durante los más de tres años que median entre la portada de *El País* y ese artículo, los medios de comunicación fueron el escenario de la controversia científica en torno al Hombre de Orce. La publicación de los resultados en revistas científicas no bastaba para conseguir la aceptación y validación de nuevos descubrimientos; para Agustí y Moyà la arena pública no era solo necesaria, sino imprescindible para esta aceptación.

La polémica se mantuvo viva, con altibajos, hasta la muerte de Gibert en 2007, a consecuencia de un cáncer. Y resurgió en 2013, a raíz del descubrimiento de un diente de leche de un antepasado del hombre en la zona de Orce. Durante estas décadas el Hombre de Orce ha sido rechazado por la comunidad científica y olvidado por el público, abrumado por la capacidad mediática del yacimiento de Atapuerca. El Museo de Paleontología de Orce, donde el fragmento se presenta como un resto humano, es una excepción. Orce y Atapuerca presentan trayectorias paralelas con muy distinto resultado: más allá de la calidad y la cantidad de los hallazgos, la línea que separa el éxito del fracaso, o el elogio de la crítica, es muy fina y depende en buena medida de la credibilidad ganada en los medios.

La ciencia en esa «dimensión» es, pues, una ciencia en la que la polémica entre científicos, y, con ella, la competencia por el prestigio, los recursos y los nichos profesionales no ocurre solo en artículos y conferencias especializadas, sino también en la esfera pública. En ese espacio mediático los científicos, los políticos, los periodistas y las distintas audiencias desempeñan un papel importante en la presentación, validación y, en último término, la creación del conocimiento científico. IyC

PARA SABER MÁS

El mito de Atapuerca: orígenes, ciencia y divulgación. Oliver Hochadel. Publicacions de la UAB, 2013.

The Orce Man. Controversy, media and politics in human origins research. Miquel Carandell Baruzzi. Brill, 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los primeros europeos. Josep Gibert, Paul Palmqvist y Bienvenido Martínez en *IyC*, diciembre de 1994.

¿Comienza África en los Pirineos? Camilo José Cela Conde en *IyC*, enero de 1996.

El Hombre de Orce. Domènech Campillo y Josep Gibert en *IyC*, marzo de 1996.

por David Serrano Larraz

David Serrano es científico de la Estación Biológica de Doñana, del CSIC, y trabaja en la conservación de aves amenazadas.



Hacia una transición energética que no merme la biodiversidad

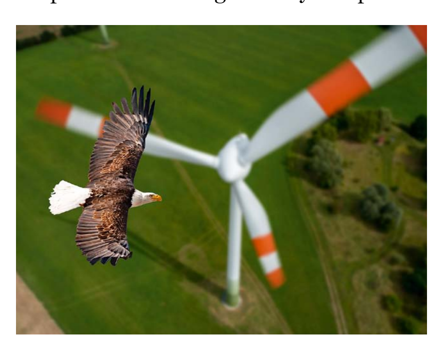
El despliegue de las renovables y la conservación de las especies deben ir de la mano

Uno de los retos más importantes a los que se enfrenta la humanidad es frenar los efectos del cambio climático, una realidad que amenaza su propio bienestar. Nuestros gobernantes están abordando este desafío mediante ambiciosos planes de transición energética a partir de un sistema socioeconómico asentado en la quema de combustibles fósiles, la causa principal de los gases de efecto invernadero y del calentamiento global [*véase* «Cómo descarbonizar la economía», por Óscar Arnedillo y Jorge Sanz; Investigación y Ciencia, junio de 2020]. Las energías renovables están llamadas a ser los actores principales de esta transformación. Sin embargo, estas tienen un lado oscuro que puede agudizar otro de los grandes problemas que hemos generado las sociedades modernas: la crisis de la biodiversidad.

Lejos de la imagen publicitaria de aerogeneradores girando silenciosos con melodiosos cantos de aves de fondo, las renovables y las infraestructuras asociadas a ellas (accesos, subestaciones eléctricas, líneas de evacuación) pueden producir graves problemas ambientales, según señalamos varios expertos en *Science* el pasado diciembre. Los impactos son muy variados y en ocasiones complejos, y abarcan desde alteraciones en las condiciones microclimáticas hasta la fragmentación de hábitats y de poblaciones naturales.

Las dos tecnologías más extendidas en España, la eólica y la solar fotovoltaica, necesitan desplegarse en extensas superficies y suelen ocupar suelo barato, donde viven algunas de las comunidades de vertebrados más amenazadas y singulares de Europa. El principal problema de los aerogeneradores es la mortalidad que causan a las aves y los murciélagos cuando chocan contra las aspas. Miles de aves mueren cada año en España por este motivo, entre las que preocupan sobre todo las especies de rapaces amenazadas. Aunque existen distintas medidas correctoras, no hay pruebas sólidas de que ninguna de ellas funcione de forma general. Para los murciélagos, las cifras de mortalidad ascienden a cientos de miles de individuos, un daño que en este caso es posible minimizar parando las turbinas cuando la velocidad del viento es baja, aunque raramente se hace.

En cuanto a las fotovoltaicas, el despliegue en nuestro país hasta la fecha ha sido modesto, pero los cientos de proyectos que se están tramitando corroboran un patrón claro: la gran mayoría prevén



ocupar áreas agrícolas poco productivas, sobre todo cultivos herbáceos de secano en régimen extensivo. Se trata de un paisaje de alto valor ecológico y cultural donde viven muchas aves esteparias, muy amenazadas ya por la galopante acción humana en esos ambientes. Por su propia naturaleza, estas aves no pueden convivir con las fotovoltaicas, que pueden acabar de rematar sus últimas poblaciones.

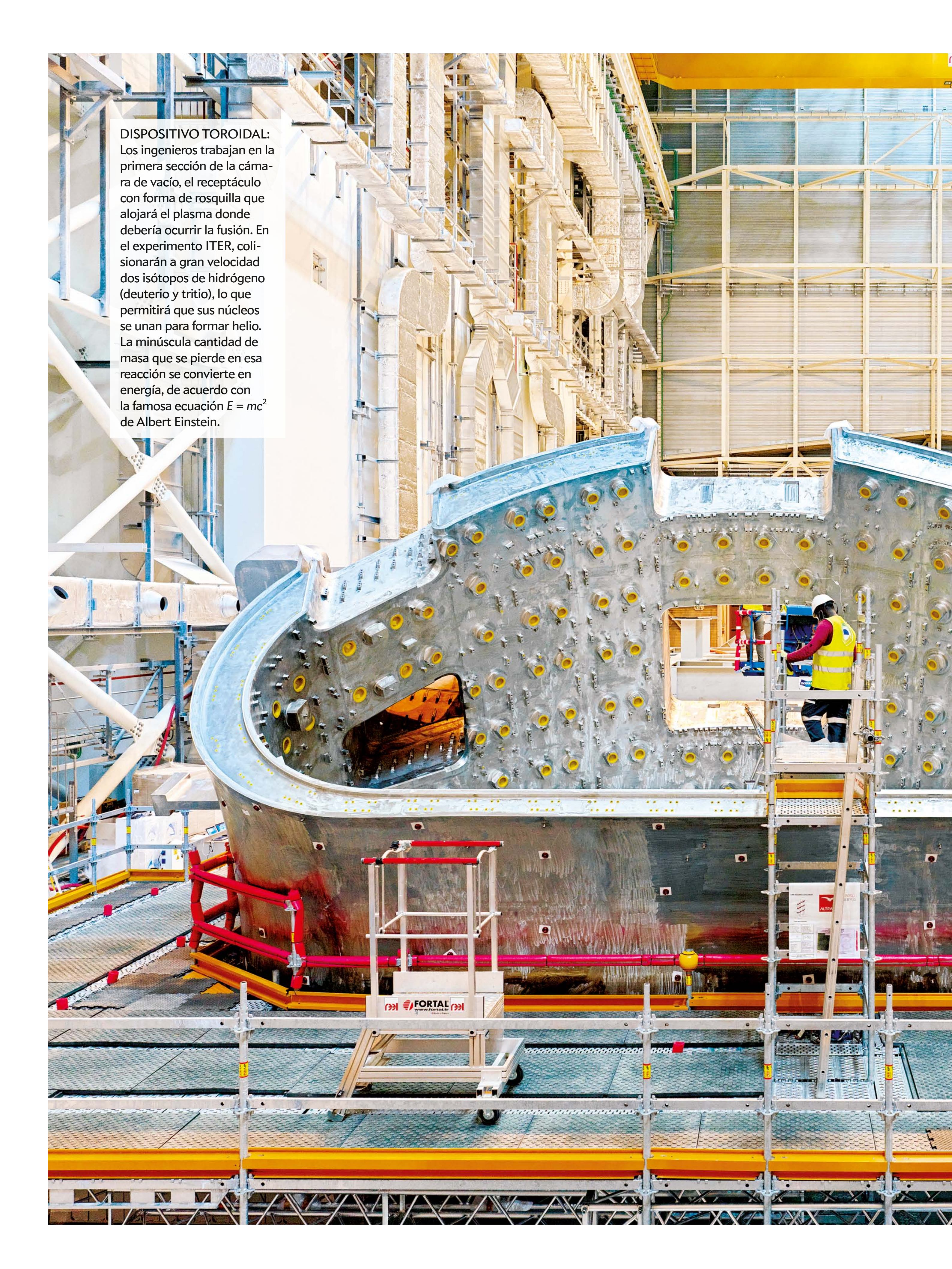
Tal y como está planteada, la hoja de ruta para la descarbonización de la economía española va a requerir la ocupación de cientos de miles de hectáreas con renovables. ¿Cómo puede conciliarse ello con la conservación de la biodiversidad? Lo primero que debemos tener claro es que la lucha contra el cambio climático y contra la pérdida de biodiversidad debe hacerse de forma integrada. Existe un gran consenso científico, reflejado en las directrices de distintos organismos e instituciones internacionales, que señala que para evitar daños indeseados es clave no instalar las centrales en áreas de alto valor ambiental. La mejor forma de lograr esta integración es mediante una cuidadosa planificación estratégica que tenga en cuenta la distribución de la biodiversidad más singular y amenazada.

El Gobierno español presentó a finales del año pasado una zonificación del territorio en función de su vulnerabilidad a los proyectos eólicos y fotovoltaicos. Aparte de que resulta insuficiente para algunos de los valores naturales más significativos, al no ser vinculante, no ha evitado que cientos de proyectos se hayan autorizado o estén en vías de tramitación. Además, por ser las comunidades autónomas las que evalúan y autorizan la mayoría de los proyectos, a menudo admiten el fraccionamiento de grandes proyectos en instalaciones más pequeñas para sortear la obligación legal de su tramitación por la Administración General del Estado.

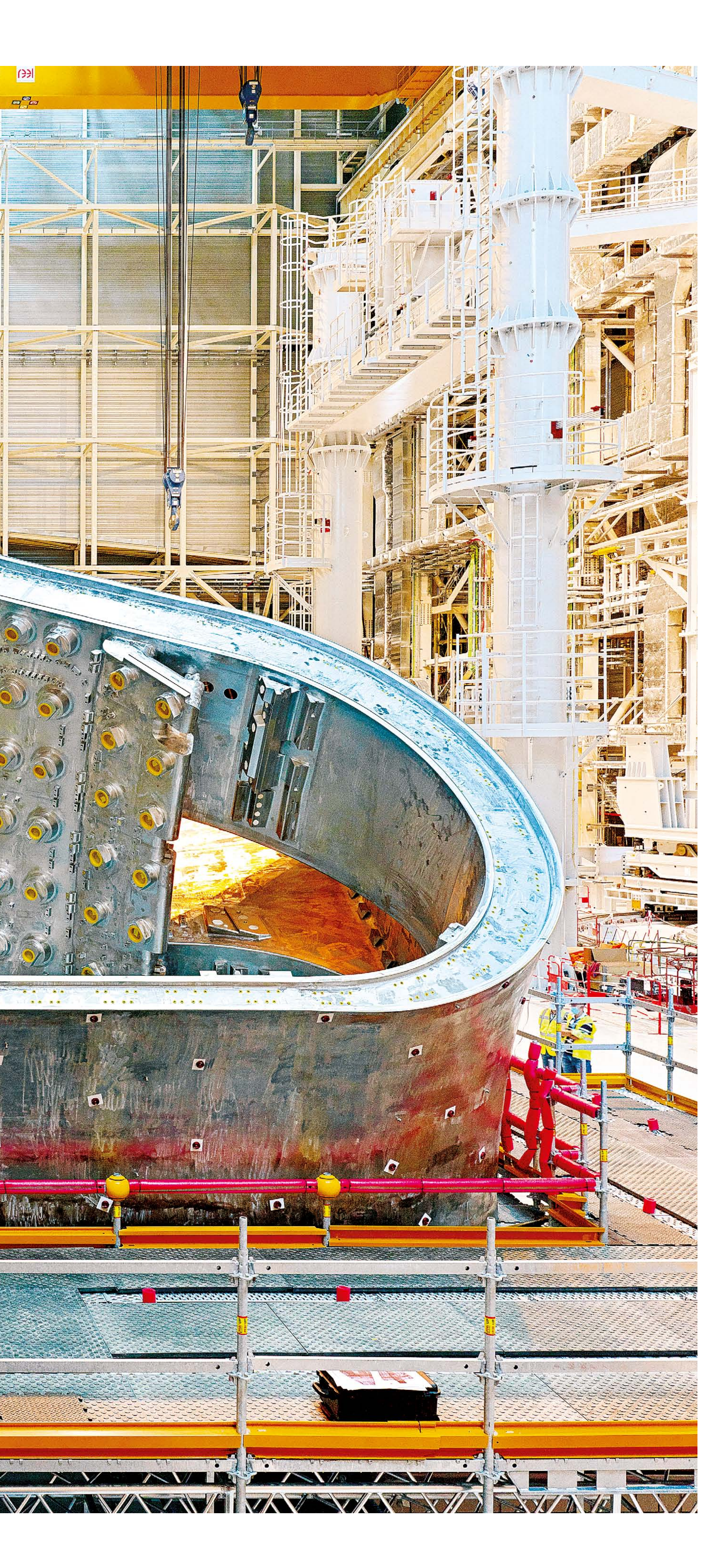
La carrera por atraer inversiones sin una ordenación integral del territorio puede tener consecuencias irreversibles para la naturaleza de nuestro país, una de las más ricas y variadas de Europa. Ya son muchas las instalaciones autorizadas en áreas de máxima sensibilidad. No siguen las recomendaciones de la Evaluación Ambiental Estratégica del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima y se han aprobado tras estudios de impacto ambiental a menudo tendenciosos que contemplan medidas correctoras insuficientes.

De seguir en esta línea, la transición energética se realizará a expensas del patrimonio natural, algo inaceptable en virtud del objetivo de restauración de la biodiversidad del Pacto Verde Europeo y de la abundante legislación autonómica, nacional y europea sobre conservación. Sería muy lamentable que la transición fuera recordada por haber intentado solucionar un problema agravando otro. IyC

GETTY IMAGES/ANDREAS NESSLINGER/ISTOCK



DISPOSITIVO TOROIDAL: Los ingenieros trabajan en la primera sección de la cámara de vacío, el receptáculo con forma de rosquilla que alojará el plasma donde debería ocurrir la fusión. En el experimento ITER, colisionarán a gran velocidad dos isótopos de hidrógeno (deuterio y tritio), lo que permitirá que sus núcleos se unan para formar helio. La minúscula cantidad de masa que se pierde en esa reacción se convierte en energía, de acuerdo con la famosa ecuación $E = mc^2$ de Albert Einstein.



ENERGÍA

MÁS CERCA DE LA FUSIÓN

Ha comenzado el montaje del experimento ITER, el mayor reactor de fusión del mundo

Clara Moskowitz

Fotografías de Manuela Schirra y Fabrizio Giraldi

Clara Moskowitz es redactora sénior de *Scientific American* especializada en física y ciencias del espacio.

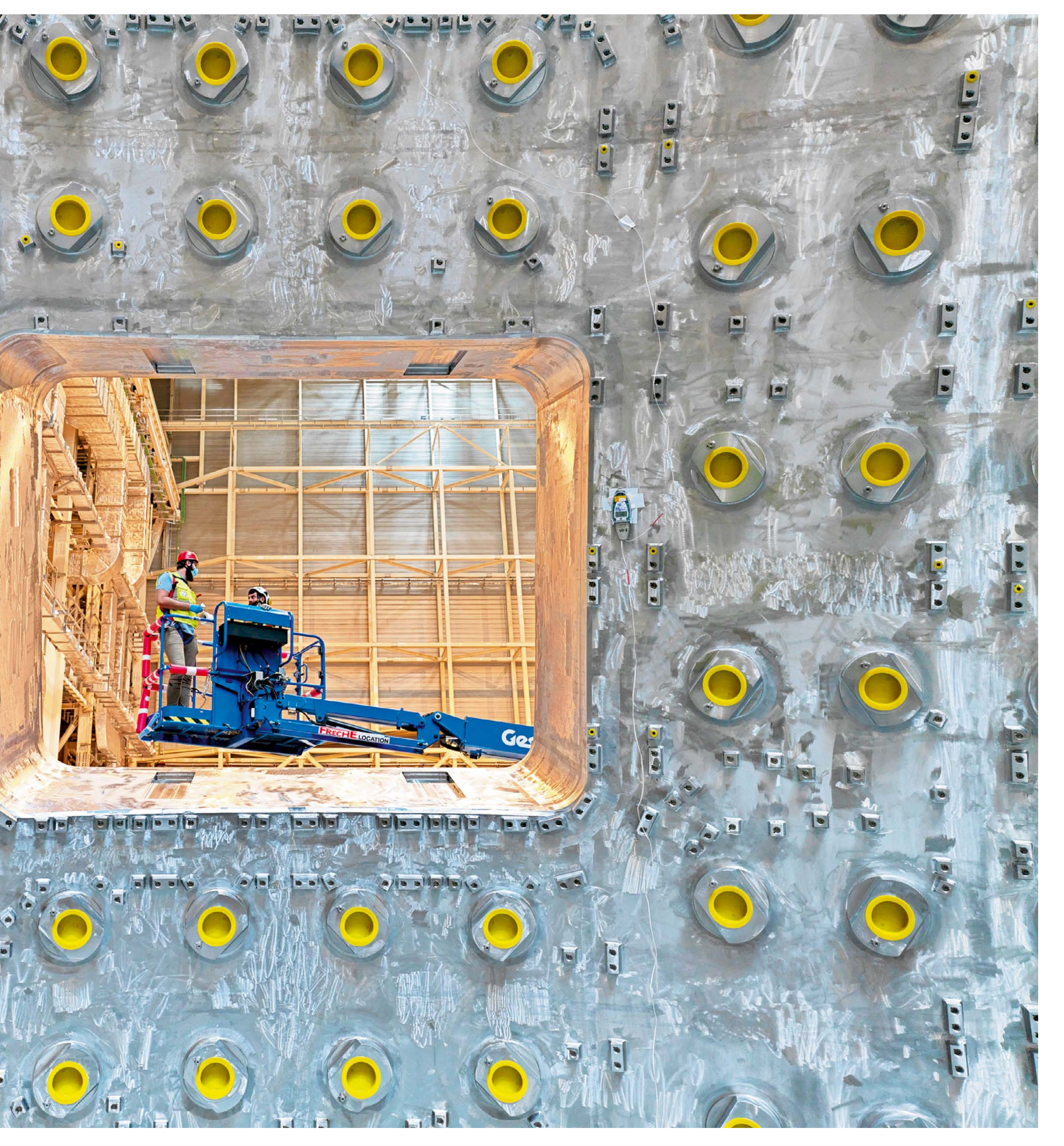


Los humanos somos una especie ávida de energía, y las fuentes actuales no bastan para saciarnos. La fusión nuclear, el proceso que alimenta al Sol, podría ofrecer la energía limpia y abundante que necesitamos, siempre que los científicos logren dominarla. El proyecto ITER representa nuestro intento más ambicioso de aprovechar la energía que se libera al hacer que dos núcleos se fundan. Este reactor de 20.000 millones de euros, ubicado en la localidad francesa de Saint-Paul-lès-Durance, es una iniciativa conjunta de la Unión Europea, China, India, Japón, Corea del Sur, Rusia y Estados Unidos. Su meta es conseguir lo que ningún experimento de fusión ha logrado: generar más calor del que consume.

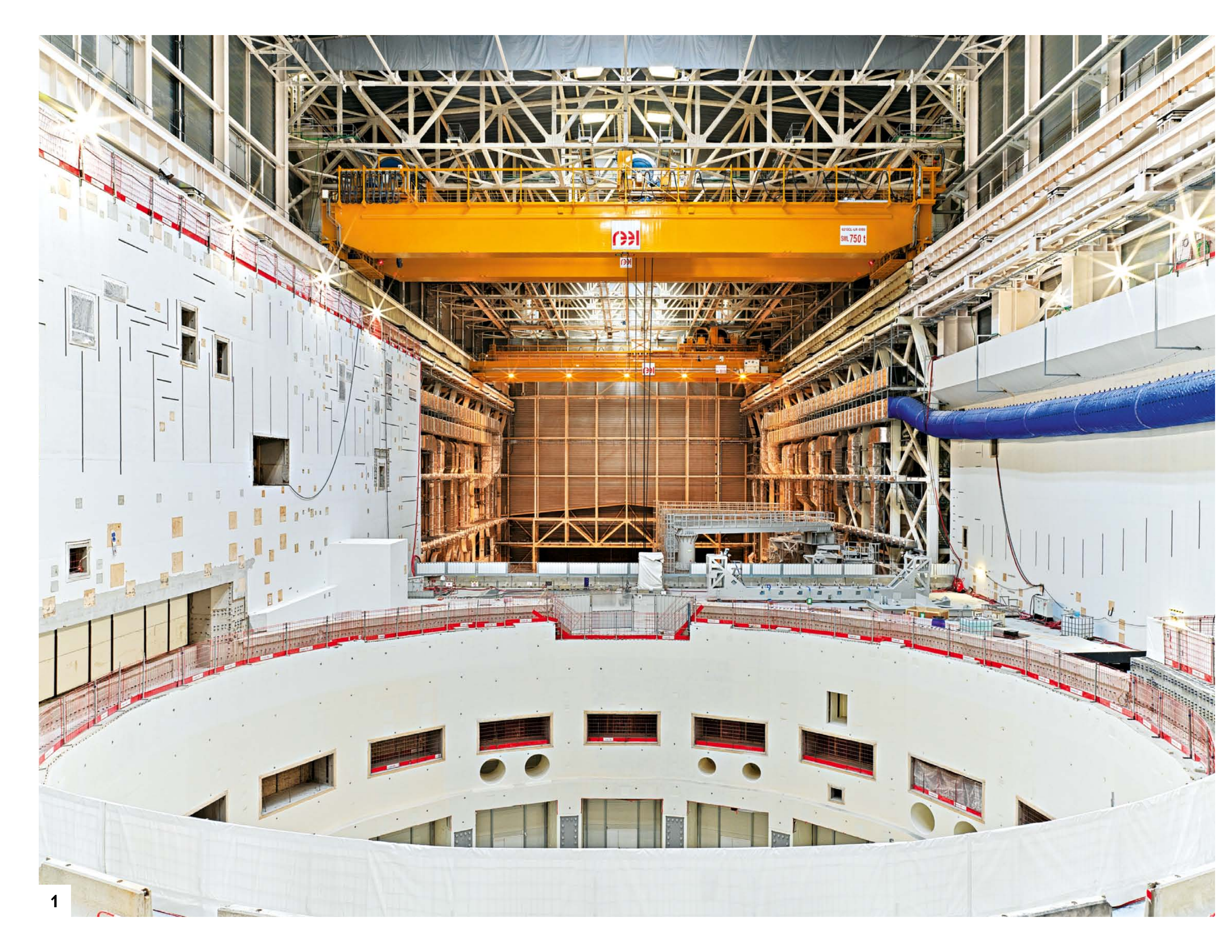
El proyecto ha sufrido sucesivos retrasos, su coste se ha disparado y hace unos años una auditoría independiente obligó a reestructurar la cúpula directiva. A ojos de los escépticos, el experimento —que ni siquiera aspira a ser una central nuclear operativa, sino una mera prueba de concepto— es un despilfarro de tiempo y dinero. Pero en julio de 2020, ITER alcanzó un ansiado hito: comenzó de manera oficial la fase de montaje, en la que los científicos ensamblarán los diversos componentes suministrados por los países socios. «Nos sentimos como alguien que debe correr varias maratones seguidas y logra concluir la primera, pero es consciente de que aún le queda mucho», ilustra Bernard Bigot, que asumió el cargo de director general de ITER en 2015. «Esto nos da confianza de cara al futuro, pero sabemos que no hay nada garantizado.»

El reto equivale a construir una estrella en miniatura dentro de un laboratorio y luego controlarla. El elemento central del experimento es un cilindro de 23.000 toneladas, donde potentes imanes superconductores tratarán de confinar un plasma a 150 millones de grados Celsius durante el tiempo suficiente para que se produzca la fusión. La física implicada plantea un desafío formidable, y otro tanto ocurre con la construcción. «Se trata de un proyecto internacional a gran escala, cuyas piezas se fabrican en todo el mundo y deben encajar como las de un rompecabezas para que todo funcione», explica Saskia Mordijck, física experta en plasmas del Colegio William & Mary de Virginia que no forma parte del equipo de ITER.

Los científicos confían en encender el reactor en 2025 y prevén que opere a pleno rendimiento en 2035. Si el experimento tiene éxito, la recompensa será enorme: la fusión nuclear podría liberar mucha más energía que la combustión del carbón o el petróleo, e incluso que la fisión en que se basan las centrales nucleares tradicionales. Además, no produce gases de efecto invernadero ni residuos radiactivos. «Desde mi punto de vista, la fusión es la única opción capaz de complementar las energías renovables y ofrecer la solución al cambio climático», sostiene Bigot. «Los próximos tres o cuatro años serán cruciales.»



GRADIENTE DE TEMPERATURA: ITER albergará uno de los lugares más calientes del universo (la cámara de vacío que contendrá el plasma a 150 millones de grados Celsius) y también uno de los más fríos, ya que los imanes que confinarán y controlarán ese plasma deben permanecer a unos cuatro kelvin (–269 grados Celsius). Ambas secciones estarán separadas y aisladas por un «manto» de acero revestido de berilio, que se unirá a la pared interior de la cámara de vacío mediante un sistema de anclajes, actualmente cubiertos con tapas amarillas para resguardarlos del polvo.



TAMAÑO RÉCORD: El dispositivo del experimento ITER se alojará en un foso cilíndrico, visto aquí desde arriba (*1*) y desde el interior (*2*). Dicho aparato recibe el nombre de tokamak, acrónimo ruso de «cámara toroidal con bobinas magnéticas», inventado por el físico Igor Golovin en 1957. El tokamak de ITER será el más grande que se ha construido nunca y doblará en tamaño al mayor de los que hay en activo. Su base se introdujo en el foso en julio de 2020, lo que marcó el inicio del montaje del reactor en el sur de Francia. Europa sufraga casi la mitad del coste total del proyecto a través del organismo Fusion for Energy.

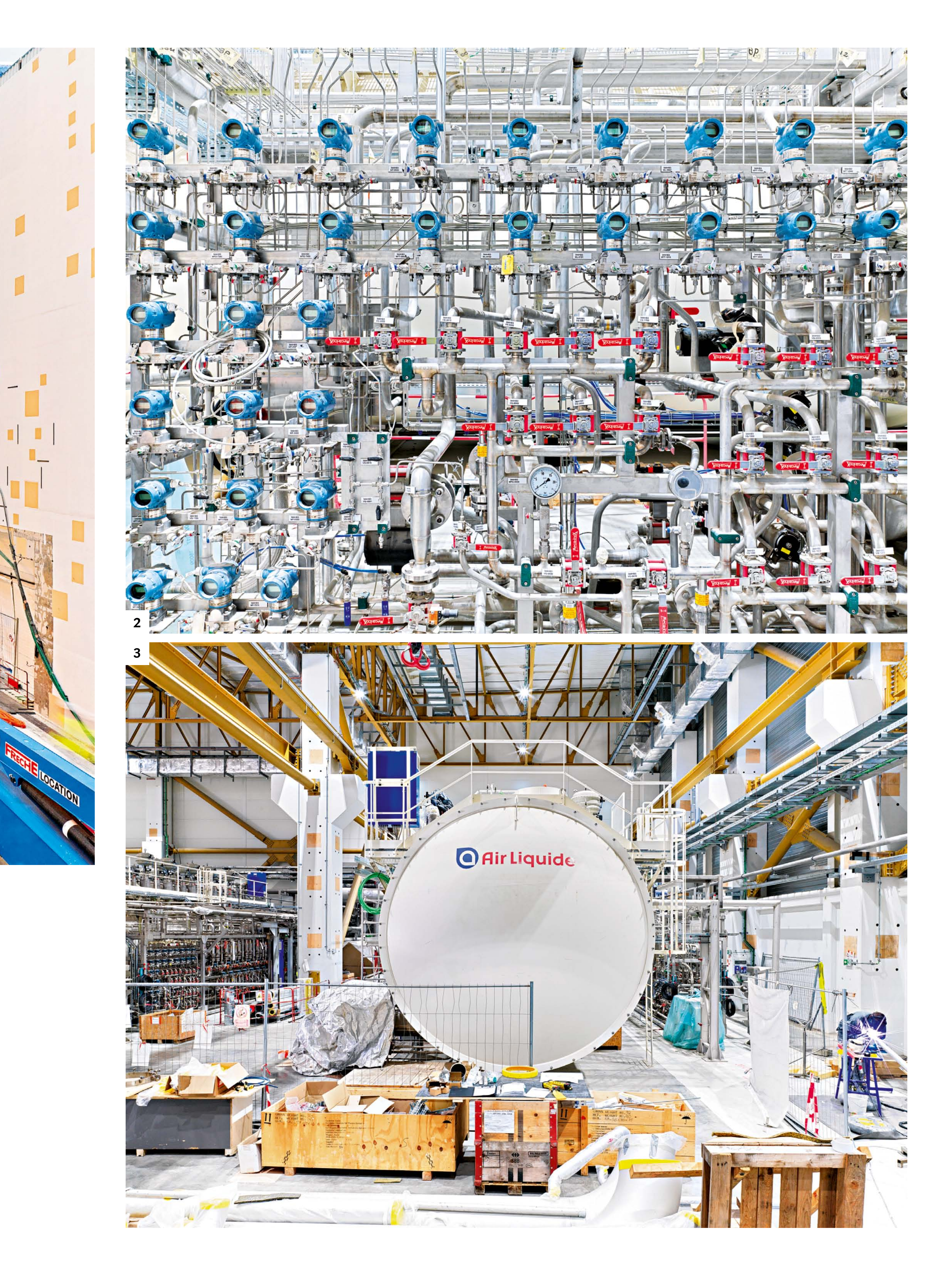


2



CÁMARA DE VACÍO: La vasija de vacío de ITER constará de seis segmentos, construidos en Corea del Sur e Italia. Hubo que enviar las enormes secciones de acero en barco al puerto de Fos-sur-Mer, cerca de Marsella, desde donde viajaron por carretera hasta el emplazamiento del reactor, unos 100 kilómetros al noreste. Ahora que ya han llegado las primeras piezas, los obreros las conectarán con los imanes y los blindajes térmicos y las bajarán al foso del tokamak (*1*).

PLANTA CRIOGÉNICA: Los imanes superconductores del reactor solo funcionan a temperaturas ultrafrías cercanas al cero absoluto, que se mantendrán haciendo circular helio líquido mediante bombas criogénicas. Los operarios usarán un complejo conjunto de válvulas manuales (*2*) para controlar el sistema a partir de las lecturas locales de presión, temperatura y flujo. Esta unidad de refrigeración por helio, construida por la empresa Air Liquide (*3*), será la mayor del mundo.


FRECHE LOCATION
2
3
Air Liquide



JAULA MAGNÉTICA: Un sistema de imanes superconductores —el mayor jamás construido— confinará y controlará el plasma del experimento ITER. La cámara de vacío toroidal tendrá un gran solenoide en su centro y estará rodeada por 6 bobinas circulares de campo poloidal (como la de la imagen), que se apilarán unas sobre otras en horizontal, y 18 bobinas de campo toroidal dispuestas en vertical. Los superconductores no oponen resistencia al paso de la corriente eléctrica, de modo que los electrones pueden moverse libremente y crear campos magnéticos muy intensos.

BOBINAS SUPERCONDUCTORAS: Las cuatro mayores bobinas de campo poloidal, hechas de niobio y titanio, son los únicos elementos del experimento ITER fabricados in situ. Con diámetros de entre 17 y 24 metros y pesos de hasta 400 toneladas, son demasiado grandes para trasladarlas desde otro lugar. La imagen muestra la bobina de campo poloidal n.° 6, dentro de un criostato.



PARA SABER MÁS

ITER: The giant fusion reactor. Bringing a sun to Earth. Michel Claessens. Springer, 2019.

Página web del proyecto ITER: https://www.iter.org

EN NUESTRO ARCHIVO

Las dificultades de la fusión nuclear. Michael Moyer en *IyC*, mayo de 2010.

Las piezas ausentes del proyecto ITER. Geoff Brumfiel en *IyC*, enero de 2013.

La fusión alternativa. W. Wayt Gibbs en *IyC*, enero de 2017.



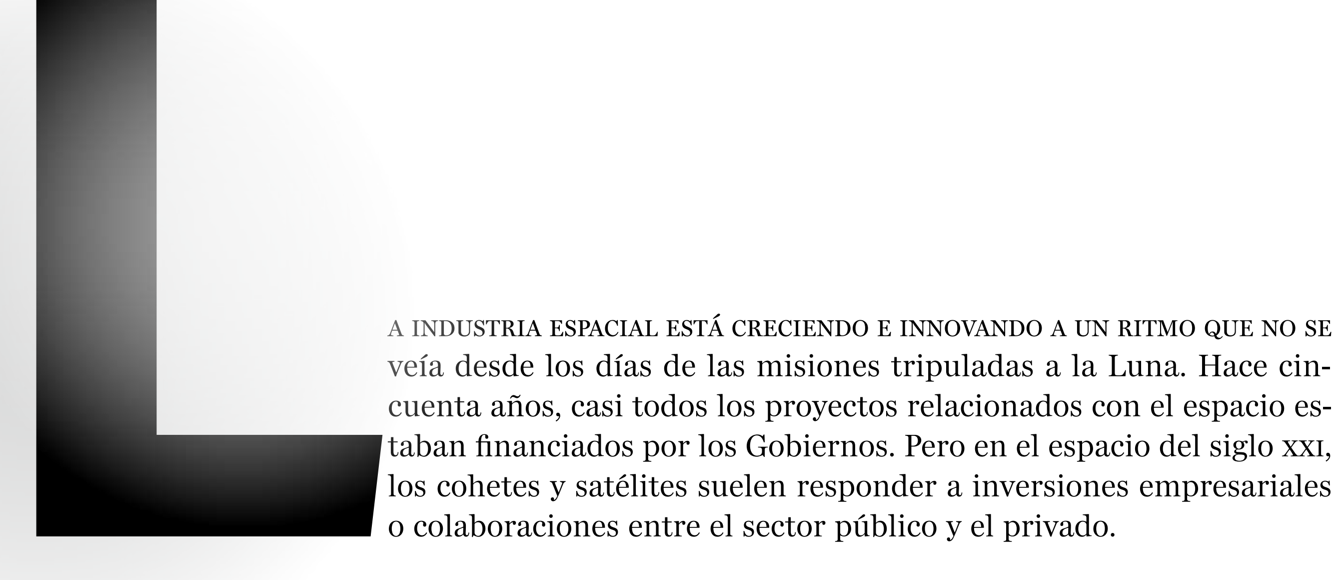
LA COLUMNA DE GASES de este cohete Soyuz-FG ruso, lanzado desde Kazajistán en 2015, brilla debido a la oxidación del hollín.

VUELOS ESPACIALES

CONTAMINACIÓN ESPACIAL

La nueva industria privada de lanzamientos espaciales tiene mucho que aprender del sector de la aviación en cuanto a sostenibilidad

Martin N. Ross y Leonard David



LA INDUSTRIA ESPACIAL ESTÁ CRECIENDO E INNOVANDO A UN RITMO QUE NO SE veía desde los días de las misiones tripuladas a la Luna. Hace cincuenta años, casi todos los proyectos relacionados con el espacio estaban financiados por los Gobiernos. Pero en el espacio del siglo XXI, los cohetes y satélites suelen responder a inversiones empresariales o colaboraciones entre el sector público y el privado.

Libre de las ataduras gubernamentales, la industria espacial se parece cada vez más a la aviación en su manera de operar: reutilización, cadencia regular de vuelos y producción en serie de naves espaciales y lanzaderas. Los analistas predicen que la contribución del sector espacial al PIB mundial podría rebasar el 1 por ciento hacia el año 2040, y es razonable imaginar escenarios futuros donde la industria de la aviación y la espacial tengan un peso económico equiparable.

Desde la Segunda Guerra Mundial, buena parte de los extraordinarios progresos realizados en el sistema de propulsión y el fuselaje de los aviones se han guiado por criterios de sostenibilidad, centrados sobre todo en las emisiones de los motores a reacción. Los reactores modernos expulsan muchos menos gases contaminantes y hollín que los de hace cincuenta años. La presión para reducir dichas emisiones ha resultado positiva para la aviación, puesto que perfeccionar el proceso de combustión del motor hasta rozar la máxima eficiencia teórica ha hecho que disminuya el consumo de combustible, algo beneficioso para las cuentas de las compañías y para el planeta Tierra.

En cambio, el desarrollo de sistemas espaciales no se ha preocupado demasiado por la sostenibilidad. Al igual que los reactores, los motores de los cohetes expulsan a la atmósfera diversos gases y partículas que pueden tener efectos regionales o incluso globales. Aun así, suele ignorarse el impacto ambiental de los vehículos de lanzamiento, como resultado de comparar el consumo de combustible de los aviones y los cohetes de una manera simplista.

El argumento es el siguiente: en un año, los cohetes queman solo el 0,1 por ciento del combustible que consumen los aviones y, en consecuencia, representan solo el 0,1 por ciento del problema ambiental que supone la aviación. Pero se trata de una falsa equivalencia. Una comprensión profunda de todas las fases de un vuelo espacial muestra que sus emisiones pueden producir alteraciones atmosféricas totalmente distintas (y a veces incluso peores) a las causadas por la aviación.

NASA, GETTY IMAGES

A diferencia de lo que ocurre con la aviación, la contaminación de la industria espacial afecta a todas las capas de la atmósfera. Las precipitaciones enseguida arrastran a la superficie las emisiones que liberan los reactores en la troposfera, pero las de los cohetes en la estratosfera se eliminan muy despacio. Esas emisiones estratosféricas se van acumulando, así que se suman los gases de escape de todos los lanzamientos y reentradas en la atmósfera de los últimos cuatro o cinco años. Y la frágil capa de ozono se encuentra precisamente en la estratosfera, cerca de donde se concentra la contaminación de los cohetes.

El panorama de los viajes espaciales se presenta más apasionante que nunca. Los avances del sector (como los pequeños satélites de alto rendimiento, las megaconstelaciones en órbitas bajas, los nuevos propelentes de cohetes o la extracción de recursos lunares) impulsan el crecimiento del «nuevo espacio» del siglo XXI. Esos adelantos podrían hacer realidad una antigua ambición: que las travesías espaciales sean tan comunes como los vuelos en avión [*véase* «Aerolíneas espaciales», por David H. Freedman. Investigación y Ciencia, febrero de 2011]. Pero ¿siguen una senda sostenible esas nuevas técnicas espaciales?

GASES DE ESCAPE

Los gases de escape de los cohetes, igual que los de los reactores, se componen sobre todo de dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, sustancias cuyo impacto global se conoce bien: el CO_2 es un gas de efecto invernadero de larga duración, mientras que el vapor de agua es uno de corta duración. El CO_2 y el agua de las emisiones espaciales representan menos del 1 por ciento de la cantidad que libera la aviación, y sus concuencias actuales son pequeñas. No obstante, hay que examinar más a fondo algunos componentes secundarios expulsados por los cohetes.

El perclorato de amonio, un oxidante presente en los motores cohete de propulsante sólido (MCPS), contiene cloro, la mayor amenaza para el ozono estratosférico. Las muestras recogidas hace veinte años por aviones de la NASA revelaron que las columnas de gases de esos cohetes creaban «miniagujeros» de ozono que persistían varios días tras el lanzamiento, aunque desaparecían conforme la estela repleta de cloro se disipaba en la estratosfera. Además, la cantidad de cloro que emiten cada año los MCPS es pequeña y efímera en comparación con la que procede de los famosos clorofluorocarbonos. Así pues, cabe esperar que no suponga un grave peligro para la capa de ozono.

Los científicos entienden bien cómo afectan las emisiones de dióxido de carbono, agua y cloro de los cohetes al ozono y el clima. Y todos los estudios indican que su impacto es insignificante frente a otras fuentes de contaminación. Aunque esas emisiones asociadas a los lanzamientos aumentaran en un orden de magnitud, sus repercusiones serían pequeñas. Pero hay otro componente en los gases de escape que sí podría ser relevante: las partículas de alúmina y de carbono negro (hollín).

EMISIÓN DE PARTÍCULAS

Los cohetes exhiben brillantes columnas de gases, conocidas como «plumas». La «llama» de un motor cohete impulsado por hidrocarburos se debe sobre todo al resplandor incandescente de las partículas de hollín que se oxidan en la columna caliente, aunque la producción de esas partículas es un proceso complejo que no comprendemos muy bien. El hollín se forma en las cámaras de combustión, en las paredes de las toberas que enfrían el combustible y en los generadores de gas de las turbobombas, y parte de él se consume en las columnas de gases. Los motores de los aviones son mucho menos complicados y, en comparación, muy limpios: algunos tipos de motores cohete alimentados por hidrocarburos expulsan cientos de veces más hollín por kilogramo de combustible quemado que los reactores. Y los aviones alcanzan la estratosfera en contadas ocasiones, mientras que los cohetes lo hacen en cada lanzamiento.

¿Por qué es preocupante el hollín en la estratosfera? El carbono negro absorbe la luz solar de forma muy eficiente, y la energía absorbida se transfiere al aire circundante. Por tanto, el hollín actúa como una fuente de calor y calienta la estratosfera, lo que, a su vez, puede alterar levemente la circulación de la atmósfera global. Y como la concentración de ozono es inversamente proporcional a la temperatura, una estratosfera más cálida se traduce en una disminución de la capa de ozono. Todavía no sabemos si la flota actual de cohetes emite suficiente hollín como para producir un efecto significativo en la atmósfera, ya que los modelos climáticos necesarios apenas han empezado a desarrollarse.

Las columnas de gases de los motores cohete de propulsante sólido son aún más brillantes que las de los impulsados por hidrocarburos, y el origen de su llama está en las gotas de alúmina incandescentes que salen de la tobera. Dado que las estelas se dispersan y acaban mezcladas con la atmósfera global, es posible encontrar partículas de alúmina de los MCPS en muestras de aire estratosférico recogidas al azar entre el ecuador y los polos. En la década de 1990, se descubrió que en la superficie de esas partículas se producen reacciones químicas que destruyen el ozono, pero se desconoce cuánto contribuye la alúmina a su desaparición en la estratosfera. Como hemos visto, los MCPS emiten también cloro gaseoso, así que estos cohetes representan para el ozono una doble amenaza, la cual no está bien caracterizada. Al evaluar la destrucción de la capa de ozono en 2018, la Organización Meteorológica Mundial reconoció la existencia de grandes lagunas en nuestra comprensión y señaló que está «justificado» realizar más investigaciones.

Los MCPS del transbordador espacial son los más grandes que hayan volado jamás, y a menudo se da por hecho que ese

Martin N. Ross es científico en The Aerospace Corporation, organización que lidera la investigación sobre el impacto de los sistemas de propulsión aeroespacial en la atmósfera terrestre. Fue coautor de la *Evaluación científica de la destrucción del ozono* publicada en 2018 por la Organización Meteorológica Mundial.

Leonard David es periodista experto en ciencias del espacio y autor de *Marte: Nuestro futuro en el planeta rojo* (National Geographic, 2019).

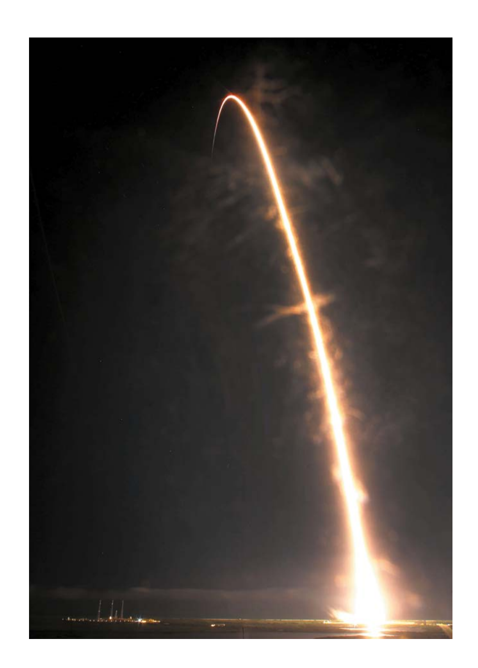
EN SÍNTESIS

Aunque la industria espacial genera muchas menos emisiones que la aviación, eso no significa que podamos ignorar su impacto ambiental.

Los lanzamientos de cohetes y la reentrada de basura espacial producen gases y partículas que pueden alterar la atmósfera y dañar la capa de ozono.

Resulta urgente caracterizar mejor esa contaminación y sus repercusiones ambientales para evaluar la sostenibilidad del sector espacial.

tipo de motores dejaron de usarse con la retirada del transbordador. En cambio, cada vez están más presentes en los lanzamientos de todo el planeta. Los MCPS del Sistema de Lanzamiento Espacial, con más de 3 metros y medio de diámetro, batirán el récord cuando la nueva generación de cohetes de carga pesada de la NASA despegue por primera vez en noviembre de 2021. Aunque no tardarán en verse eclipsados por un MCPS chino de casi 4 metros, cuyo vuelo inaugural está previsto para el año 2025. Los MCPS constituyen un peligro creciente y poco entendido para el ozono estratosférico.



LANZAMIENTO de la cápsula Crew Dragon de SpaceX en noviembre de 2020. La nave, propulsada por un cohete Falcon 9, transportó astronautas hasta la Estación Espacial Internacional.

TODO LO QUE SUBE BAJA

La contaminación espacial no acaba cuando un cohete abandona la atmósfera. En contra de lo que suelen proclamar los medios respecto a la última y espectacular reentrada de basura espacial, los residuos orbitales que caen a la Tierra no «desaparecen» ni «se desintegran» al ingresar en la atmósfera. Algunos pedazos de naves espaciales abandonadas sobrevivirán a la reentrada y alcanzarán la superficie. No obstante, gran parte de la masa se vaporiza, y el gas resultante se condensa enseguida y forma aerosoles. Por tanto, al igual que ocurre en los lanzamientos, una estela brillante señala la producción de partículas. Pero, si bien las partículas de los lanzamientos son sencillas desde un punto de vista químico, la reentrada de basura espacial engendra un abanico de sustancias complejas. La vaporización de depósitos de combustible, ordenadores, paneles solares y otros componentes produce partículas a unos 85 kilómetros de altitud, que luego descenderán y se acumularán en la estratosfera junto con el hollín y la alúmina de los lanzamientos. Así que una reentrada genera tantas «emisiones» como un lanzamiento.

Las grandes constelaciones de satélites en órbitas terrestres bajas, con miles de aparatos cada una, confían en la vaporización de los satélites durante la reentrada para deshacerse de ellos al final de su vida útil. Una vez que se desplieguen estos enjambres, cada año se «traerán» a la Tierra cientos de toneladas de satélites averiados, y la mayoría de esa masa dará lugar a partículas en la atmósfera media. Sabemos muy poco sobre la producción de polvo durante la reentrada, la microfísica de las partículas y su efecto sobre el ozono y el clima.

El sector espacial ha entrado en una fase de crecimiento que recuerda a los primeros días de la aviación. Cuando una técnica se asienta en la economía de mercado, no hay límites para sus posibles aplicaciones. Al igual que la aviación, la industria espacial expulsa a la atmósfera gases y partículas a través de los sistemas de propulsión, pero una comparación entre las emisiones de ambos sectores debe tener en cuenta el modo tan diferente en que afectan a la atmósfera de la Tierra.

Por el momento, las emisiones de CO_2 de los reactores seguirán superando con creces a las de los cohetes. Eso se refleja en los cálculos, tan bienintencionados como errados, de una «huella de carbono» convencional para el espacio. Y es que el CO_2 no constituye el principal campo de batalla de la contaminación espacial. Las partículas generadas en los lanzamientos de cohetes y en la reentrada de residuos orbitales provocan alteraciones mucho más importantes en la química, dinámica y radiación atmosférica que las emisiones de CO_2. La huella de carbono de la industria espacial es un asunto complejo que aún no se ha definido de manera adecuada.

La reciente polémica sobre el brillo de los satélites que giran en órbitas bajas pone de manifiesto que la sostenibilidad debe convertirse en un aspecto esencial del desarrollo de sistemas espaciales [*véase* «Preservar el cielo nocturno», por Ronald Drimmel. Investigación y Ciencia, septiembre de 2020]. Resultará más fácil garantizar el uso expedito de dichos sistemas si evaluamos de antemano su impacto ambiental en todas las fases de su vida, y así es como la aviación aborda la sostenibilidad. Las preocupaciones ambientales que surgen tras la implementación promueven las regulaciones, mientras que un análisis exhaustivo previo inmuniza contra ellas.

Irónicamente, solo el espacio puede ofrecernos la perspectiva necesaria para gestionar nuestro planeta. La imagen de la «salida de la Tierra» captada por el Apolo 8 a menudo se asocia con el inicio del ecologismo global; y, sin embargo, no sabemos lo suficiente sobre las emisiones de la propia industria espacial para responder preguntas clave acerca de su impacto ambiental y sostenibilidad. Tomando como modelo la aviación, un programa científico adecuado incluiría mediciones de las estelas de lanzamiento y reentrada, modelos detallados que vayan desde los gases recién expulsados hasta la mezcla global en estado estacionario, y experimentos de laboratorio relacionados con la microfísica de los distintos tipos de partículas generadas desde el lanzamiento hasta la reentrada. Y esta iniciativa debería contar con la colaboración de empresas y Gobiernos.

El sector espacial está listo para adquirir un mayor peso en la economía global, justo en un momento en que la sostenibilidad se está tornando una meta común en todo el mundo. ¿Cómo sería una industria espacial sostenible? ¿Qué amenazas regulatorias se ciernen sobre el desarrollo espacial? No sabremos las respuestas a estas cuestiones hasta que llevemos a cabo un programa de investigación constante y coordinado a escala mundial sobre las emisiones de la industria espacial. IyC

PARA SABER MÁS

The policy and science of rocket emissions. Martin N. Ross y James A. Vedda. The Aerospace Corporation, abril de 2018.

The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review. Jessica A. Dallas et al. en *Journal of Cleaner Production*, vol. 255, art. 120209, mayo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Investigación espacial de bajo coste. S. Alan Stern en *IyC*, junio de 2013.

Un cohete para llegar a Marte. David H. Freedman en *IyC*, agosto de 2015.

La basura espacial se amontona. Mark Fischetti en *IyC*, agosto de 2019.

RED HUBER, GETTY IMAGES

ECOLOGÍA



Los cuidadores de los suelos

Los colémbolos, unos artrópodos diminutos y a menudo desconocidos, abundan en los suelos y contribuyen a su calidad. Por ello, ocupan un lugar privilegiado en la ecología teórica y aplicada

Jérôme Cortet



LOS COLÉMBOLOS, al alimentarse de restos vegetales y otros organismos del suelo, favorecen el reciclaje de la materia orgánica y aumentan la fertilidad edáfica. Esta hembra de la especie *Calvatomina rufescens* mide alrededor de 1 milímetro de largo, un tamaño habitual en la mayoría de los colémbolos.

Jérôme Cortet es profesor de la Universidad Paul-Valéry Montpellier 3 e investigador del Centro de Ecología Funcional y Evolutiva, del CNRS, en Montpellier.



Hoy en día, las actividades humanas amenazan en particular a los suelos. A la contaminación industrial, la urbanización y el enorme aporte de residuos se suman los efectos nocivos de una agricultura intensiva que ya solo contempla el suelo como un simple sustrato para que crezcan las plantas. Las alteraciones que sufre son incontables: contaminación por plaguicidas y metales, pérdida de fertilidad, erosión, pero también merma de la biodiversidad.

Los suelos constituyen, en efecto, una extraordinaria reserva de biodiversidad. Según el atlas europeo de la biodiversidad del suelo, publicado en 2010 bajo el auspicio de la Comisión Europea, mientras que en las selvas tropicales se concentra la mitad de los cerca de 10 millones de especies animales y vegetales que se calcula que habitan nuestro planeta, en un simple puñado de tierra viven varios centenares de millares, incluso millones de especies. Aunque estas estimaciones incluyen la inmensa variedad de la vida microbiana (bacterias, hongos y arqueas), ha llegado el momento de reconsiderar el suelo y tener en cuenta su biodiversidad no solo por lo que es, sino también por lo que aporta en términos de servicios a la humanidad.

De hecho, los organismos que pueblan el suelo aseguran varias funciones esenciales. Descomponen y reciclan la materia orgánica. También estructuran físicamente la tierra al modificar los agregados (los «ladrillos elementales» de los que están compuestos los suelos) y su disposición, lo cual determina la porosidad edáfica y, por consiguiente, la circulación del agua y del aire. Por lo tanto, los suelos son fértiles y ofrecen soporte físico a los cultivos, gracias, en gran parte, a los organismos que cobijan. El estudio de tal biodiversidad, para conocer y preservar los servicios que esta nos presta, se convierte así en un desafío mayúsculo.

Dentro de la increíble variedad de los organismos edáficos, un grupo se revela especialmente abundante: los colémbolos. Estos pequeños animales, que rara vez miden más de uno o dos milímetros de longitud, son prácticamente desconocidos para el gran público. Con todo, los expertos los investigan desde hace tiempo. Algunos los han empleado como modelo de estudio para la compresión global de los sistemas ecológicos, dado su papel primordial en las redes tróficas y en la descomposición de la materia orgánica. Por otro lado, los colémbolos son sensibles a las variaciones fisicoquímicas y biológicas de su hábitat, característica que también convierte a estos artrópodos en instrumentos valiosos para ayudarnos a gestionar mejor los suelos.

ARTRÓPODOS HEXÁPODOS

Pero ¿qué aspecto tienen estos animales? Los colémbolos son artrópodos, es decir, poseen patas articuladas. Cada uno de los tres segmentos de su tórax porta un par de patas, al igual que el de los insectos, pero, a diferencia de estos, los colémbolos carecen

EN SÍNTESIS

Los colémbolos son un grupo de pequeños artrópodos emparentados con los insectos y los crustáceos que engloba a más de 9000 especies en todo el mundo.

Muy abundantes en los suelos, contribuyen a la descomposición y al reciclaje de la materia orgánica, así como a la fertilidad de las tierras agrícolas.

Además de servir como bioindicadores de la calidad de los suelos, pueden emplearse para evaluar la toxicidad de ciertos productos agrícolas.

Asimismo, constituyen un modelo práctico y valioso para poner a prueba ciertas teorías en ecología.

de alas. Sobre la cabeza se alzan dos antenas y su abdomen está compuesto por seis segmentos, a veces fusionados. Entre otras peculiaridades, numerosas especies presentan en la extremidad del abdomen un divertículo en forma de horquilla de dos ramas, la «fúrcula». Esta suele estar replegada bajo el abdomen, pero puede desplegarse de repente, lo que permite al animal ejecutar saltos impresionantes de hasta varios centímetros de altura en función de la especie. Es por esta singularidad que los anglosajones bautizaron a los colémbolos con el término *springtails*, nombre común que podríamos traducir por «colas saltarinas».

Los colémbolos poseen también, bajo el primer segmento del abdomen, otro divertículo, más o menos desarrollado según la especie, denominado «colóforo», un tubo ventral que en algunas especies puede evaginarse de forma considerable. Gracias a sus secreciones e intercambio de líquidos con el exterior, este órgano permite al animal regular su presión osmótica, es decir, conservar agua en su interior incluso cuando el medio exterior es más seco o contiene más sales. También le posibilita adherirse a un sustrato. Fue este órgano el que inspiró al británico John Lubbock la denominación del grupo en 1870: *colémbolo* deriva de las voces griegas *embolon* («proyección») y *kolla* («que se adhiere»). A pesar del colóforo, estos artrópodos permanecen muy sensibles a las variaciones de humedad y son higrófilos: pueden respirar en el aire, pero precisan un ambiente húmedo.

Los científicos han censado hasta hoy unas 9200 especies de colémbolos en el mundo (más de 2200 en Europa), y muchas otras están aún por descubrir. Es una cifra reducida si se compara con otros grupos de artrópodos (el más numeroso es el de los coleópteros —escarabajos, carábidos, mariquitas, lucánidos, etcétera—, que engloba a más de 370.000 especies conocidas). Sin embargo, estos hexápodos exhiben una gran variedad de formas (redondeadas o alargadas), colores y tamaños (de una fracción de milímetro a varios milímetros; el más pequeño que se conoce mide 0,12 milímetros, y el más grande, 17 milímetros).

¿Qué papel desempeñan los colémbolos en la ecología del suelo? Al ser organismos descomponedores, intervienen en el reciclaje de la materia orgánica, aunque de forma más bien indirecta. Se alimentan principalmente de hongos, bacterias, algas y pólenes, por lo que actúan como reguladores de las poblaciones microbianas. Puesto que ingieren microorganismos, contribuyen asimismo a propagar sus esporas. Las bolitas fecales de los colémbolos, muy ricas en materia orgánica y moco, favorecen también el desarrollo microbiano.

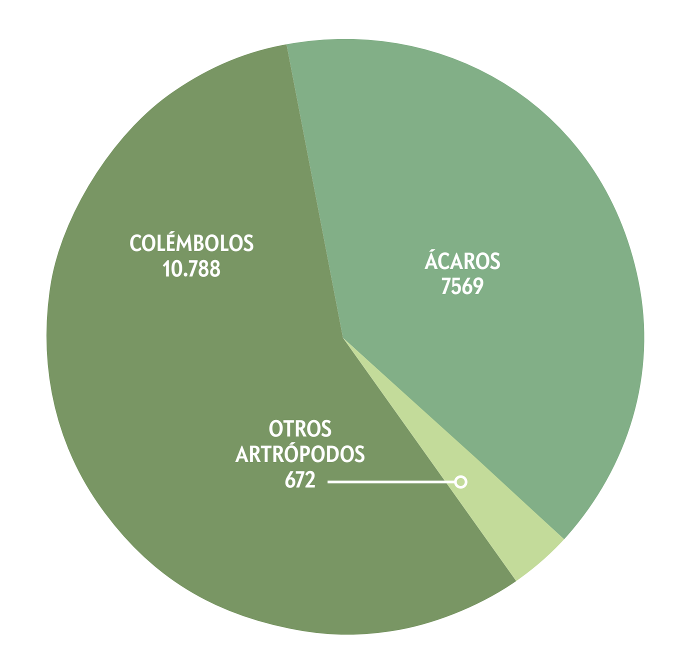




MUY ABUNDANTES: En los ambientes forestales europeos se han contabilizado unos 10.000 colémbolos por metro cuadrado, entre ellos *Sminthurides aquaticus* (1) y *Podura aquatica* (2).

FUNCIONES ESENCIALES EN EL ECOSISTEMA EDÁFICO

En 1999, dos investigadores canadienses, John Klironomos y Peter Moutoglis, demostraron en el laboratorio que los colémbolos fomentan la propagación de los hongos micorrícicos. Estos últimos resultan cruciales para la mayoría de las plantas vasculares: al asociarse con sus raíces, les proporcionan un mayor aporte de agua y sales minerales, ya que aumentan de forma notable la superficie de absorción [*véase* «Micorrizas: la simbiosis que conquistó la tierra firme», por Marc-André Selosse; Investigación y Ciencia, septiembre de 2019]. Por tanto, la acción de los colémbolos no se limita solo a la hojarasca y a la descomposición de la materia orgánica, sino que se extiende al conjunto de la rizosfera, es decir, toda la zona del suelo que abarca las raíces de las plantas. Es por ello que la fertilidad edáfica depende de ellos. Por otro lado, los colémbolos sirven de presa a numerosos



MAYORITARIOS: Los colémbolos son el grupo más numeroso en el suelo y se sitúan por delante de los ácaros. El resto de los artrópodos (proturos, dipluros, pequeños insectos en forma adulta o larvaria, milpiés diplópodos y ciempiés quilópodos, seudoescorpiones, arañas, etcétera) son muy minoritarios. El diagrama ilustra la abundancia por metro cuadrado de los principales grupos de microartrópodos en 110 suelos (8 suelos forestales, 52 tierras de cultivo y 47 suelos de praderas) muestreados en Bretaña en 2006 y 2007.

DATOS OBTENIDOS EN EL MARCO DEL PROGRAMA RMQS BioDiv

invertebrados (ácaros depredadores, seudoescorpiones, carábidos, ciempiés, arañas), lo que los sitúa en el corazón de las redes tróficas del suelo.

Desde hace unos años, estos pequeños hexápodos constituyen un modelo de estudio muy apreciado en el campo de la ecología llamada «funcional», es decir, la que trata sobre las relaciones entre les comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas, y que estudia las capacidades de los organismos para actuar o reaccionar en el seno del ecosistema. Estas facultades están ligadas a los rasgos funcionales de los individuos, concepto que se ha desarrollado sobre todo en los últimos veinte años.

En este sentido, junto con Mickaël Hedde y Benjamin Pey, del Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Medio Ambiente (INRAE) y de la Escuela Nacional Superior de Agronomía de Tolosa, en Francia, y otros colaboradores, definimos en 2014 los rasgos funcionales de los invertebrados del suelo. Estos corresponden a cualquier característica morfológica, fisiológica, fenológica (es decir, vinculada a la periodicidad y a la sincronización de la reproducción en los animales) o conductual que pueda medirse a escala individual, pero que no hace referencia a ningún otro tipo de organización, en especial taxonómica (especies, familias, órdenes y otros taxones). Esta definición retomaba la planteada por Cyril Violle, ecólogo vegetal del Centro de Ecología Funcional y Evolutiva, del CNRS, en Montpellier, a la vez que añadía la faceta conductual, propia de los animales.

Puesto que los colémbolos son muy abundantes en los suelos y muestran variaciones morfológicas y fisiológicas muy marcadas y fácilmente identificables (citaremos algunos ejemplos más adelante), ofrecen la posibilidad de estudiarlos desde distintos puntos de vista: por un lado, puede evaluarse cómo les afectan las condiciones ambientales; por otro lado, puede analizarse su función en la descomposición de la materia orgánica y otros procesos. En el primer caso, nos referiremos a menudo a «rasgos de respuesta»; en el segundo caso, a «rasgos de efectos», aun cuando esta distinción no sea siempre evidente.

En los colémbolos, de momento nos hemos concentrado sobre todo en los rasgos morfológicos, tales como la longitud del cuerpo, la presencia o ausencia de ocelos (ojos simples), la pigmentación o la presencia o ausencia de fúrcula, pero también a veces en rasgos fisiológicos y conductuales, como la capacidad o no de reproducirse por partenogénesis (reproducción sin machos) o las preferencias alimentarias.

A partir de las medidas efectuadas en los individuos o de los valores conocidos en cada especie, se obtiene una estimación global del valor de cada uno de los rasgos dentro de la comunidad observada. De este modo, en lugar de considerar una comunidad que engloba un conjunto de especies, consideramos una comunidad que atesora un conjunto de rasgos con la hipótesis de que esa comunidad de rasgos está vinculada a una función. Y de la misma manera que podemos estimar la riqueza específica (número de especies) de una comunidad, también podemos calcular su riqueza funcional refiriéndonos a un conjunto de rasgos. Cuanto mayor sea la diversidad de rasgos de la comunidad, mayores serán sus capacidades funcionales dentro del ecosistema y, por tanto, mayor será su riqueza funcional.

La puesta en práctica de estos planteamientos ha permitido identificar diversos rasgos de respuesta en los colémbolos. En colaboración con Lucia Santorufo y otros investigadores de la Universidad Federico II de Nápoles, en 2015 demostramos que, en los entornos urbanos y periurbanos de la ciudad de Nápoles, los ecosistemas perturbados con mayor frecuencia favorecían a los individuos con reproducción sexual (en la que participan machos y hembras) en detrimento de los individuos con reproducción partenogenética. En efecto, una reproducción sexual comporta una mayor mezcla genética y, por tanto, una mayor probabilidad de que la especie pueda hacer frente a una alteración.

En general, el uso del suelo, es decir, la ocupación del suelo por bosques, cultivos, praderas, jardines o entornos urbanos, ejerce un efecto sobre las comunidades de rasgos. Lo hemos comprobado en un análisis reciente, realizado en colaboración con colegas de la Universidad de Lorena, de los datos recabados desde hace veinte años en más de 800 lugares de muestreo en Francia. Hemos demostrado que los espacios abiertos (praderas, cultivos), a diferencia de los espacios cerrados (bosques), priorizan a los colémbolos de gran tamaño (varios milímetros) dotados de órganos locomotores (fúrcula y patas) y sensoriales (ocelos y largas sedas llamadas «tricobotrios») bien desarrollados, así como de una marcada pigmentación.

Estos resultados confirman los de un primer estudio publicado en 2014 y llevado a cabo a escala europea por Sandrine Salmon, del Museo Nacional de Historia Natural de París, y sus colaboradores. Además, en 2016, Corentin Abgrall, de la Universidad de Ruan, y varios investigadores demostraron que, en diversos suelos de los márgenes del Sena, las comunidades de rasgos de las plantas influían sobre las comunidades de rasgos de los colémbolos. Así, los vegetales que tienen una mayor capacidad de acumular biomasa van de la mano de un mayor número de colémbolos poco pigmentados. Algo comprensible, ya que la abundancia de materia orgánica beneficia a los colémbolos que viven en lo profundo del suelo, los cuales suelen ser blanquecinos, puesto que la pigmentación no desempeña ningún papel adaptativo en un ambiente desprovisto de luz.

Más de 9000 especies en todo el planeta

Los colémbolos están distribuidos por toda la Tierra, en todas las altitudes y latitudes, de los polos al ecuador. En la mayoría de los suelos, son los artrópodos más abundantes, con valores de entre varios miles y varios cientos de miles de individuos por metro cuadrado. Numerosas especies habitan también sobre la nieve o en la superficie del agua. Este grupo zoológico existe desde hace al menos 400 millones de años. Ya mencionados por Linneo, los colémbolos se asemejan mucho a los insectos y durante largo tiempo fueron clasificados como insectos «apterigotos», es decir, desprovistos de alas. Desde hace varios decenios, se los incluye en el grupo de los hexápodos «entognatos» (aquellos cuyas piezas bucales están encajadas dentro de la cabeza), clase que engloba también a los dipluros y los proturos. De hecho, sus parientes más cercanos no serían los insectos, sino los crustáceos.

A partir de su morfología, junto con criterios relativos a la disposición de las sedas sobre el cuerpo, los especialistas han clasificado unas 9200 especies de colémbolos conocidas. La clasificación se afianzó en los albores del siglo XXI y se ha perfeccionado estos últimos años a partir de datos moleculares. Hoy los colémbolos se clasifican en cuatro órdenes que agrupan un total de unas 33 familias. Los simfipleones (más de 1200 especies) poseen un cuerpo globular y algunos de sus segmentos abdominales están en parte fusionados con los segmentos torácicos. Los artropleones (orden de los poduromorfos y los entomobriomorfos) presentan un cuerpo alargado en forma de palo en el que se distingue con claridad el tórax del abdomen. El cuarto orden, los neelipleones, solo suma unas sesenta especies conocidas, de aspecto similar al de los simfipleones.











LAS ESPECIES DE COLÉMBOLOS, en general de pocos milímetros, presentan una gran variedad de tamaños. Ello se observa si comparamos a *Orchesella villosa* con *Entomobrya nicoleti*, mucho más pequeña (1). Su morfología es también muy diversa, según ilustran estos ejemplares de *Deutonura monticola* (2), *Katianna* (especie sin determinar) (3), *Isotoma viridis* (4) y *Orchesella flavescens* (5).

Se precisan aún numerosos estudios para comprender mejor la ecología funcional de los colémbolos. Hasta ahora solo unos pocos han analizado los rasgos de efectos. Los que están siendo explorados en la actualidad son los rasgos vinculados a las piezas bucales (presencia o no de placas molares trituradoras, longitud y forma de las piezas bucales) y sus efectos sobre los procesos de descomposición. También parece indispensable retomar numerosas investigaciones iniciadas a finales del siglo xx, que tenían por objeto identificar y comparar en el laboratorio los efectos de distintos rasgos de los colémbolos sobre la descomposición de los restos de las plantas según las características de estas. Los rasgos de interacción, que intervienen en las relaciones entre individuos de una misma especie o de especies diferentes, tales como los órganos implicados en la comunicación química, son asimismo una vía en la que ahondar para comprender mejor la complejidad de las redes tróficas.

Sea como sea, este enfoque de la ecología funcional plantea también numerosas preguntas metodológicas sobre la medición estandarizada de los rasgos y sobre nuestra capacidad de evaluar aquellos que resultan de interés. Es el caso de los rasgos fisiológicos y conductuales, que precisan una observación minuciosa de las especies sobre el terreno o el laboratorio.

También surge la cuestión de la variabilidad de los rasgos en una misma especie. Así, tras recopilar los valores reseñados en las principales claves de identificación de los colémbolos disponibles a escala europea, en 2018 constatamos que, para una especie concreta, la longitud del cuerpo aumenta con la latitud, y que esta variabilidad puede modificar en gran medida los efectos de una alteración ambiental, como la presencia de un contaminante.

Finalmente, varios estudios publicados estos últimos años han puesto de manifiesto una relación entre rasgos y filogenia, habida cuenta de que ciertos rasgos se conservan en determinados grupos. Por ejemplo, la forma del cuerpo (globular o alargada) muestra una correlación directa con la filogenia: los colémbolos del grupo de los simfipleones poseen un cuerpo redondeado, mientras que el de los artropleones es alargado. Así, el rasgo observado podría en algunos casos ser simplemente heredado, sin que pueda establecerse un vínculo directo con una supuesta variable ambiental o una función concreta. Conviene, pues, identificar bien los rasgos de interés que permitan responder a las hipótesis planteadas.

BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS

Dado que los colémbolos son abundantes y los hallamos en todas las altitudes y latitudes, y dado que sus poblaciones reaccionan a las presiones ambientales de formas que empezamos a conocer bien, los científicos los contemplan desde hace varios años como muy buenos candidatos para evaluar la calidad biológica de los suelos o seguir la evolución de su biodiversidad. También solemos recurrir a los colémbolos en el laboratorio para evaluar la toxicidad y la seguridad de plaguicidas recién comercializados en los organismos contra los que no va dirigida su acción.

En Francia, investigaciones impulsadas por la Agencia de transición ecológica (ADEME) a partir de datos procedentes de 758 emplazamientos, nos permitieron publicar en 2017 valores de referencia relativos a la abundancia de colémbolos (número de individuos por unidad de superficie) y la riqueza en especies (número de taxones por muestra) de los suelos según sus principales usos. La abundancia resulta ser mucho menor en los espacios agrícolas, en especial los suelos cultivados y las viñas, que suman como media entre 4000 y 6000 individuos por metro cuadrado, en comparación con los ambientes forestales (entre 10.000 y 12.000 individuos) o incluso los espacios urbanos (19.000 individuos).

En efecto, los suelos agrícolas exhiben varias características especialmente desfavorables para las comunidades de colémbolos: alteraciones frecuentes del hábitat debidas al paso del arado que remueve las capas superficiales del suelo y de la maquinaria agrícola que las compacta; empobrecimiento edáfico por la retirada de materia orgánica, que es la base de las cadenas

CICLO BIOLÓGICO

Desarrollo y reproducción

Al contrario de los insectos, los colémbolos no presentan estados larvarios ni ninfas. De los huevos eclosionan directamente individuos parecidos a los adultos, que irán creciendo en mudas sucesivas. El ciclo biológico varía mucho según las especies y los entornos. Por ejemplo, la pequeña *Sphaeridia pumilis* puede completar un ciclo completo (de huevo a huevo) en tan solo ocho días, mientras que otras especies tardan varias semanas. La reproducción de los colémbolos es, asimismo, variada; algunas especies parecen ser solo partenogenéticas, mientras que en otras hay machos y hembras que se distinguen a veces morfológicamente. Ejecutan incluso paradas nupciales complejas, en las que el macho y la hembra se sujetan uno al otro por las antenas.



UNA PAREJA de ***Stenacidia violacea*** **en plena parada nupcial sujetándose por las antenas.**

de sus prácticas sobre la biodiversidad de los suelos.

Por otra parte, varios programas de investigación incorporan una reflexión sobre cómo lograr que esos instrumentos estén disponibles para el mayor número de personas posible y cómo ponerlas en práctica de forma habitual, por ejemplo mediante la oferta de servicios, como es el caso actual de los análisis fisicoquímicos de los suelos. Así, la caracterización de las comunidades edáficas mediante el ADN, en lugar de los métodos clásicos de observación al microscopio, facilitaría el acceso a este bioindicador que representan los colémbolos.

Los bancos de genes incluyen ya varias decenas de especies de estos hexápodos. La dificultad reside en la caracterización adecuada del ADN contenido en los suelos, que puede estar más o menos alterado. Conviene así calibrar lo mejor posible los métodos en función de los tipos de suelos y usos. Podemos suponer que, en el caso de los suelos cultivados, las técnicas serán pronto fiables, dado el escaso número de especies halladas. Por otra parte, el enfoque basado en los rasgos, que en teoría se libra de la identificación de las especies, es asimismo una vía explorada.



APÉNDICE PARA SALTAR: En este ejemplar de *Deuterosminthurus bicinctus* se observa bien la fúrcula, el órgano del salto típico de los colémbolos. En reposo, se halla replegada bajo el abdomen.

tróficas en las que intervienen los colémbolos; escasa diversidad vegetal, que reduce los nichos ecológicos disponibles; uso generalizado de plaguicidas (algunos de los cuales ejercen un efecto tóxico directo sobre los colémbolos) y de abonos sintéticos, que modifican las propiedades del suelo, como el *p*H. Si tenemos en cuenta las comunidades de rasgos, los organismos que tienden a vivir en la superficie y a recolonizar con rapidez los entornos tras una alteración son favorecidos en detrimento de los que viven en profundidad, totalmente supeditados a los suelos y menos móviles.

Por el contrario, los suelos forestales no suelen estar labrados, por lo que ofrecen microhábitats estables a los organismos; además, la gran mayoría de la materia orgánica producida por el medio retorna al suelo. En cuanto a los suelos de los ambientes urbanos, las situaciones observadas son muy diversas según, por ejemplo, si están o no contaminados. Pero como, en su conjunto, las alteraciones físicas son menos recurrentes que en los suelos cultivados, hallamos una abundancia y diversidad a veces cercanas a las de los espacios forestales.

INSTRUMENTO PARA AGRICULTORES Y GESTORES

Esos resultados deberán volverse más precisos, sobre todo a la hora de cuantificar la repercusión de las prácticas agrícolas sobre las comunidades de especies y de rasgos de los colémbolos. Sabemos, gracias a varios ejemplos, que los efectos de la labranza son nocivos para las comunidades, pero no disponemos todavía de suficientes datos como para estimarlo cuantitativamente. Este tipo de datos están en vías de obtenerse, en especial en el programa Agro-Eco-Sol financiado por la ADEME y coordinado por la asesoría agroambiental Auréa. Sin duda, un muestreo sistemático de los suelos del territorio nacional o europeo permitiría completar los conocimientos y, a la larga, brindar a los agricultores, pero también a los gestores, herramientas para evaluar los efectos

Los colémbolos se alzan como un objeto de estudio especialmente prometedor en ecología tanto fundamental como aplicada. Pero los resultados obtenidos sobre los suelos gracias a estos pequeños animales deben transmitirse mejor no solo al gran público, sino también a los gestores, que a menudo desconocen incluso su existencia. Un esfuerzo en la educación ambiental y en el conocimiento de los suelos se torna indispensable si queremos proteger mejor este recurso que, como muchos otros, no es inagotable.

PARA SABER MÁS

The biology of the springtails (Insecta: Collembola). Stephen P. Hopkin. Oxford University Press, 1997.

European atlas of soil biodiversity. Simon Jeffery **et al.** Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, septiembre de 2010.

Planète collemboles, la vie secrète des sols. Jérôme Cortet y Philippe Lebeaux. Biotope, 2015.

Urban and industrial land-uses have a higher soil biological quality than expected from physico-chemical quality. Sophie Joimel et al. en *Science of the Total Environment*, vol. 584-585, págs. 614-621, abril de 2017.

Les sols au cœur de la zone critique. Philippe Lemanceau y Manuel Blouin (eds.), *Écologie*, vol. 6, ISTE Éditions, 2018.

La faune du sol pour évaluer l'impact des pratiques agricoles et la santé des sols. Jérôme Cortet y Mickaël Hedde en *Techniques de l'ingénieur*, artículo ge1058, abril de 2020.

Página web de Frans Janssens: www.collembola.org/

Página web de Philippe Garcelon: https://collemboles.fr/en/

EN NUESTRO ARCHIVO

Los secretos de un superviviente antártico. Douglas Fox en *IyC*, septiembre de 2020.

MEDIOAMBIENTE

SIN MADERA PARA LAS GUITARRAS ELÉCTRICAS

El fresno de los pantanos, con cuya madera se han fabricado las guitarras más famosas del mundo, está desapareciendo a causa de una serie de inundaciones y de un escarabajo xilófago

Priyanka Runwal

Fotografía de Gregory Reid



LAS CLÁSICAS GUITARRAS DE FENDER, como esta Toploader de 1959, de la línea Telecaster, se fabrican con madera de fresno de los pantanos.

EN SÍNTESIS

Algunos de los guitarristas más famosos de *rock and roll* eligen guitarras fabricadas con una madera que confiere al instrumento una sonoridad única. Esta procede de ciertas especies de fresno que viven en zonas inundables del Misisipi.

Pero varias alteraciones ambientales asociadas al cambio climático, como las crecientes inundaciones y la invasión de un escarabajo xilófago, están haciendo desaparecer estos árboles.

La grave situación de los fresnos preocupa tanto a músicos como a científicos, que no ven soluciones a corto plazo para evitar el declive de estas especies.

Priyanka Runwal es periodista especializada en ciencia y medioambiente.



Cada invierno y cada primavera, las lluvias del centro de EE.UU., sumadas al deshielo en el extremo norte del Misisipi, inundan la llanura aluvial del río, dominada por árboles de madera noble. En verano, cuando las crecidas remiten y los suelos se secan, los equipos de explotación forestal se adentran en la zona. Uno de sus objetivos es el fresno de los pantanos, un árbol que crece en los humedales y cuyas células, ampliamente espaciadas y de pared delgada, generan una madera de baja densidad —y de sonoridad especial, según dicen— que la ha convertido en el material escogido por algunos de los guitarristas más famosos del *rock and roll*.

En la década de los cincuenta del pasado siglo, la icónica empresa fabricante de guitarras Fender Musical Instruments comenzó a emplear ese tipo de fresno. El músico de *blues* Muddy Waters, los rockeros Keith Richards, de los Rolling Stones, y Chrissie Hynde, de los Pretenders, así como otras leyendas musicales, han adorado sus Fender. Para muchos, ese tipo de madera confiere a los instrumentos un timbre cálido y cristalino. El fresno de los pantanos (también conocido como «fresno musical» o «fresno *punk*») es esencialmente fresno verde (*Fraxinus pennsylvanica*), pero el término puede abarcar otras especies que crecen en llanuras aluviales, como el fresno negro (*F. nigra*) y el fresno blanco (*F. americana*). Su madera se convirtió en una parte fundamental del ADN de Fender durante décadas, según comenta Mike Born, exdirector del departamento de tecnología de la madera de la empresa estadounidense, y hubo un tiempo en que fue barata y fácil de obtener.

Pero el año pasado, una grave falta de abastecimiento obligó a Fender a anunciar que dejaría de emplearla para fabricar sus famosas líneas Stratocaster y Telecaster, y la reservaría solo para modelos *vintage* de elevado precio. Fender achacó la disminución del suministro, por un lado, a unos períodos más largos de inundación en el bajo Misisipi, un fenómeno asociado al cambio climático que pone en peligro a los árboles jóvenes y dificulta el acceso de las madereras hasta los árboles adultos; y, por otro, a la inminente amenaza de un escarabajo invasor xilófago. Music Man, otro renombrado fabricante estadounidense, mostró una preocupación similar en 2019, cuando la compañía declaró «una de las peores cosechas de la historia reciente».

La nefasta situación demuestra que las consecuencias del cambio climático pueden repercutir en cualquier ámbito de la sociedad, incluida la música. Y el suministro de fresnos pronto podría reducirse aún más, puesto que los expertos prevén que el calentamiento global continuará agravando las inundaciones. «La mayoría de los guitarristas simplemente no se lo podrán permitir», vaticina Born.

INUNDACIONES E INVASIONES

Los fresnos de la llanura aluvial del Misisipi tienen la capacidad de soportar las inundaciones estacionales. Tan pronto como la llanura se seca, los equipos de explotación forestal se ponen en marcha para recolectar la madera. «Una vez que el río ha regresado a su cauce, la maquinaria pesada puede circular por el terreno con tanta seguridad como por el aparcamiento de un hipermercado», explica Norman Davis, expresidente y actual asesor de la maderera Anderson-Tully Lumber Company, en Vicksburg (Misisipi). Davis señala que su empresa fue una vez el mayor proveedor de fresnos de Fender, pero las inundaciones, cada vez más intensas, han ido dificultando las labores. «La llanura aluvial del río ha sido prácticamente inaccesible en los últimos dos años y medio», comenta.

Según la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de EE.UU., entre junio de 2018 y julio de 2019, el país vivió los 12 meses más húmedos registrados hasta la fecha. La agencia señaló que las inundaciones producidas en la primavera de 2019 a lo largo del Misisipi figuran entre las más destructivas de la historia reciente. Y un trabajo publicado en *Nature* en 2018 demostró que las inundaciones en el área se han vuelto cada vez más frecuentes y severas en los últimos 150 años. «Las lluvias torrenciales derivadas del cambio climático incrementan la cantidad de agua que se incorpora al río», explica Gerald Galloway, experto en hidrología del río Misisipi y profesor de ingeniería civil y ambiental en la Universidad de Maryland, en College Park. Y el creciente sistema de presas, muros y diques, originalmente diseñado para prevenir inundaciones, podría empeorar la situación.

El fresno verde, un árbol de zonas pantanosas particularmente apreciado, es una especie de rápido crecimiento que se ha adaptado a las inundaciones estacionales. Pero la prolongación de los períodos de crecida puede acarrear problemas, en especial en los árboles jóvenes. «Si solo hablamos de una inundación asociada a una crecida temprana que desaparece en un par de semanas, ello no tiene consecuencias graves para el fresno», apunta Brady Self, especialista forestal en maderas nobles de llanuras aluviales del Servicio de Extensión de la Universidad Estatal de Misisipi. Pero estos árboles no están preparados para soportar año tras año inundaciones de larga duración. «Si el agua se estanca durante meses y los fresnos jóvenes no consiguen asomar la cabeza, pueden tener dificultades para sobrevivir», advierte Self. Lee Jones, de la maderera J. M. Jones Lumber Company, en Natchez (Misisipi), asegura haber observado algunos daños. «Las crecidas se han mantenido durante tanto tiempo que han matado ya a muchos árboles», añade.

Pero existe, además, una segunda amenaza: el barrenador esmeralda del fresno. Las larvas de este escarabajo invasor, nativo de Asia, perforan la madera y alteran la capacidad de los árboles de transportar agua y nutrientes. Desde que se detectó el primer caso en el país (en Míchigan en 2002), la plaga se ha extendido a 35 estados de EE.UU. y a cinco provincias canadienses, y ha matado ya a millones de fresnos autóctonos. «Creo que, de todos los insectos que hemos visto atacar árboles, es el que se propaga con mayor rapidez», señala Jennifer Koch, bióloga del Servicio Forestal estadounidense.

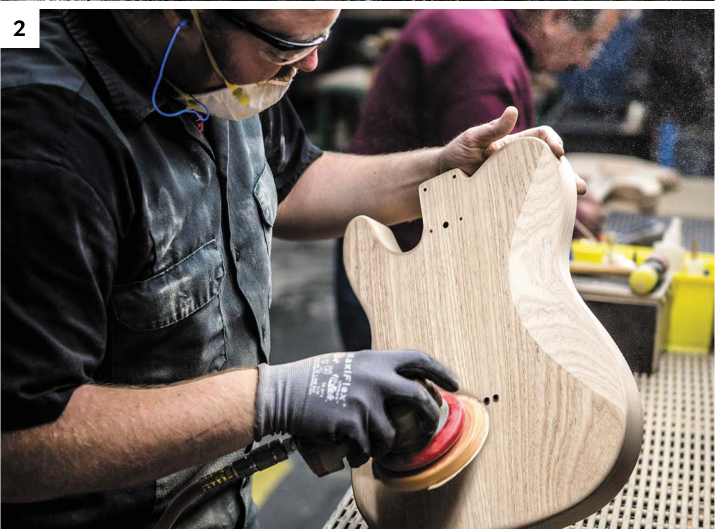
El barrenador esmeralda del fresno no ha alcanzado todavía la llanura aluvial del bajo Misisipi, pero Koch asegura que es solo cuestión de tiempo. En 2015, conscientes de la amenaza, varias madereras comenzaron a recolectar todos los fresnos adultos de las áreas seleccionadas para la tala anual. En los años anteriores limitaban la recolección a un 30 por ciento de esos árboles. Según Koch, la decisión tiene sentido en las circunstancias actuales, pero deja menos árboles para el futuro.

ELECCIÓN DEL GUITARRISTA

El anuncio de Fender de abandonar la madera de fresno ha provocado cierta consternación en el mundo de la guitarra. Para Richie Kotzen, quien saltó a la fama hace décadas con los grupos de *heavy metal* Poison y Mr. Big, tiene implicaciones personales: hace poco se enteró de que sus emblemáticas guitarras Fender, cuyo cuerpo se elaboraba con fresno desde la década de los noventa, ahora deben fabricarse con otro tipo de madera. «Hace muchos años decidí cuáles eran mis maderas favoritas en una guitarra. Me decanté por un cuerpo de fresno de los pantanos combinado con un mástil de arce y nunca quise otra cosa», comenta. «Ahora tendré que buscar un sustituto para el fresno.»

Existen algunas opciones, como el aliso rojo, originario de la costa oeste de Norteamérica. Desde finales de los cincuenta, Fender ha utilizado esta madera para fabricar versiones menos costosas de muchos de los modelos que elabora con fresno. Pero muchos aficionados piensan que el tono claro y la veta abierta del fresno le confieren al instrumento un aspecto más bonito, así como unos matices sonoros que lo diferencian del aliso.





LAS INUNDACIONES en las llanuras del Misisipi han puesto en peligro el fresno de los pantanos (*1*). Su madera, ahora difícil de encontrar, confiere un aspecto especial a las guitarras, como esta Telecaster de Fender, que cobra forma en una fábrica de la compañía (*2*).

«El fresno tiene un ataque muy rápido, como una palmada muy nítida», describe Brian Swerdfeger, vicepresidente del sector I+D de guitarras de Fender. «El aliso tiene un ataque más cálido y suave. Sigue siendo como una palmada, pero no tan nítida», añade.

Por otro lado, Koch y otros investigadores están tratando de obtener variedades de fresno verde (y de otras especies de fresno) resistentes al barrenador esmeralda para poder reemplazar los árboles que están desapareciendo. El proyecto tardará décadas en llevarse a cabo, pero, a la vista de un cambio climático que parece progresar de forma implacable, es poco probable que se mitiguen en un futuro los problemas causados por las inundaciones en la llanura aluvial. La grave situación preocupa tanto a músicos como a científicos. «Puedo adaptarme a una madera nueva», asegura Kotzen. «Pero me preocupa mucho más la cuestión ambiental.»

El área inundada del Misisipi cerca de donde talan las compañías de Jones y Davis retrocedió el pasado verano y los equipos de explotación forestal han regresado a la llanura aluvial. Sin embargo, los fresnos de la región seguirán siendo un bien precario en un futuro previsible. «Hay una gran demanda, pero no creo que vayamos a tener mucho fresno *punk* que vender», comenta Jones. «Simplemente, no quedan suficientes árboles.»

Dado que las generaciones venideras podrían tenerlo difícil para hacerse con una guitarra Fender de fresno, tal vez los amantes de la música deberán contentarse con el legado dejado por ese tipo de madera, tal vez poniendo a todo volumen el virtuoso solo de *Stairway to heaven* que Jimmy Page, de Led Zeppelin, interpretaba con su Dragon Telecaster fabricada con fresno de los pantanos.

PARA SABER MÁS

Climatic control of Mississippi River flood hazard amplified by river engineering. **Samuel E. Munoz et al. en *Nature*, 556, págs. 95-98, abril de 2018.**

EN NUESTRO ARCHIVO

Los infieles «micros» de la guitarra eléctrica. **Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, abril de 2018.**

W. NORMAN DAVIS (1); FENDER (2)

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona.

Hacia el horizonte y más allá

La vista no acaba en el horizonte geométrico. Gracias a la refracción atmosférica, los rayos de luz se curvan y nos permiten ver qué hay más lejos

El origen de este artículo se remonta a una pregunta aparentemente elemental que nos llegó por correo electrónico: «¿Por qué la superficie de los océanos es curva, mientras que la de los lagos es plana? ¿No debería esta última ser también curva?». La respuesta nos pareció evidente y, en esencia, respondimos como sigue: «Los lagos presentan la misma curvatura que los océanos, la cual es idéntica a la de la Tierra. Pero, dado que son mucho menos extensos, esa curvatura resulta mucho más difícil de percibir». Esto fue antes de recibir una réplica muy bien argumentada, con observaciones y

EN UNA IMAGEN tomada con el objetivo de una cámara desde la orilla del lago Bourget, en Francia, podía verse una tapia situada en el extremo opuesto del lago. Sin embargo, el muro se encontraba situado más allá del horizonte geométrico. ¿Qué efecto permitía el avistamiento?

BRUNO VACARO

cálculos precisos, que nos llegó unas horas más tarde.

Desde la orilla del lago Bourget, en la Saboya francesa, y con ayuda del objetivo de una cámara fotográfica colocada a 0,51 metros de altura, nuestro interlocutor había observado una tapia en un puerto deportivo situado al otro extremo del lago, a 16,7 kilómetros de distancia. Aquella tapia tenía una altura de 1,6 metros. Sin embargo, un cálculo sencillo demostraba que, teniendo en cuenta la curvatura de la Tierra, no debería ser posible ver ninguna estructura a aquella distancia que tuviera menos de 15 metros de altura.

Nuestro comunicante dedujo a partir de ahí que el lago tenía que ser plano, puesto que estaba viendo algo que evidentemente no debería ver: un objeto situado más allá del horizonte. ¿A qué se debía?

¿Dónde está el horizonte?

Para entender el problema, evaluemos primero la distancia al horizonte para un observador situado a una altura h sobre la superficie (*véase el recuadro* «Horizonte geométrico»). Para ello, basta con aplicar el teorema de Pitágoras a un triángulo rectángulo cuyos vértices se hallan en el centro de la Tierra (C), en la posición del observador (O) y en el punto del horizonte (H).

Si hacemos los cálculos (y dado que la altura h es siempre muchísimo menor que el radio terrestre, R), comprobaremos que la distancia d al horizonte es aproximadamente igual a $\sqrt{2Rh}$: la raíz cuadrada del doble del producto de la altura de observación por el radio de la Tierra. Si expresamos la altura h en metros, esto nos da como resultado una distancia de $3{,}6\sqrt{h}$ kilómetros.

En el caso considerado por nuestro corresponsal, vemos que, para una altura de 0,51 metros, obtenemos una distancia al horizonte de 2,6 kilómetros: mucho menor que la que mediaba hasta el otro extremo del lago. Sin embargo, esta distancia solo hace referencia al nivel de la superficie. Un objeto situado más allá del horizonte siempre podrá verse si se encuentra a lo suficientemente elevado. En el caso límite, dicha altura mínima viene dada por la situación en que los horizontes respectivos (el del observador y el del objeto) coinciden en la misma línea de visión.

¿Era esto lo que ocurría con la tapia mencionada por nuestro interlocutor? Dado que esta se encontraba a 16,7 kilómetros, la distancia a su horizonte respectivo debía ser de 16,7 – 2,6 = 14,1 kilómetros. Eso exigiría que el muro tuviera una altura de 15 metros, muy superior a su valor real, de 1,6 metros. Entonces, ¿por qué podía verse?

En realidad, la posibilidad de avistar objetos situados más allá del horizonte está documentada desde principios del siglo XIX, aunque solo para distancias mucho mayores. En 1808, durante una estancia en Marsella, el barón Francis von Zach había oído el rumor de que era posible ver el Canigó (el último pico importante de los Pirineos al este) desde la basílica de Nuestra Señora de la Guardia, por lo que se dispuso a comprobarlo él mismo durante una puesta de sol. Sin embargo, con una cumbre de 2785 metros y una altura de observación de 165 metros, la distancia entre ambos lugares hubiera tenido que ser inferior a 234 kilómetros para que el avistamiento fuera posible. No obstante, dicha distancia superaba los 260 kilómetros.

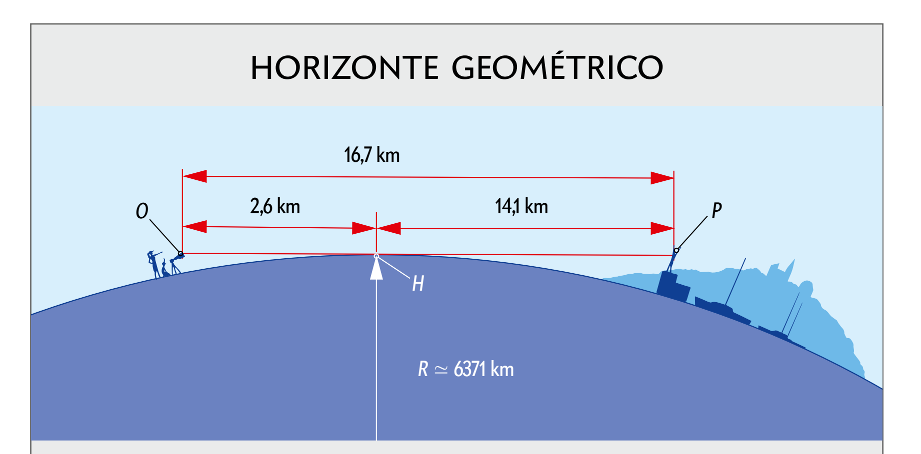
Para referirnos a un caso más conocido, ¿cuántos turistas se asombran al divisar Córcega desde la Costa Azul, incluso desde una altitud modesta? Pero desde la población de Menton, situada a 50 metros sobre el nivel del mar, no debería poder verse nada.

El efecto de la refracción

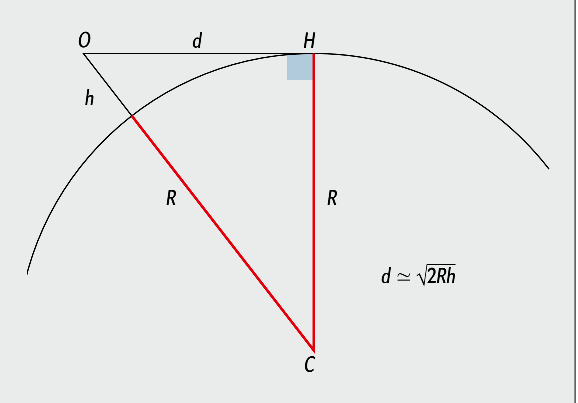
Lo que nuestro interlocutor había observado no era más que un espejismo causado por la refracción atmosférica. Debido a las variaciones de presión y temperatura, la densidad del aire depende la altitud. Y lo mismo ocurre, por tanto, con el índice de refracción de la luz y con su velocidad de propagación, inversamente proporcionales uno a otra. Así pues, en la atmósfera, la luz no se propaga en línea recta, como ocurriría en un medio homogéneo.

Para entender lo que sucede, empleemos las nociones de onda y de rayo y la relación entre ambas. Localmente, un frente de onda (el conjunto de puntos alcanzados simultáneamente por la onda

HORIZONTE GEOMÉTRICO



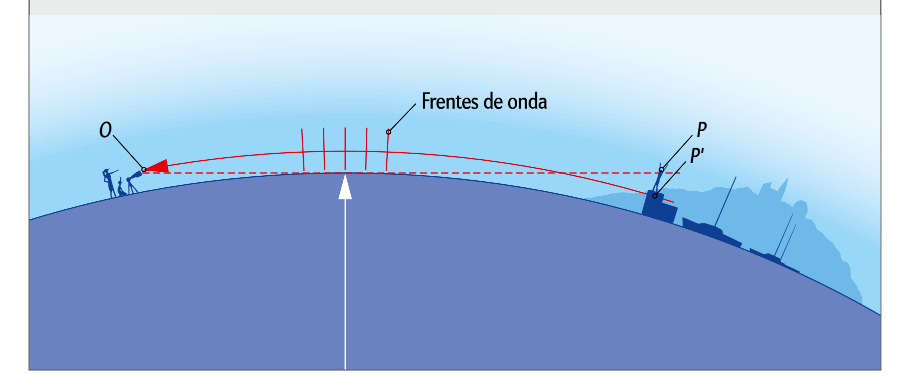
PARA UN OBSERVADOR O situado a una altura h (pequeña en comparación con el radio terrestre), el punto del horizonte, H, se halla a una distancia d aproximadamente igual a $\sqrt{2Rh}$, donde R denota el radio de la Tierra (*abajo*). Por supuesto, es posible ver un punto P situado más lejos si este se encuentra a una altura suficiente. En tal caso, la línea recta que une el observador y el punto en cuestión ha de pasar por el horizonte común, H (*arriba*). Este cálculo solo tiene en cuenta el efecto de la curvatura de la Tierra. Sin embargo, la refracción de la luz causada por la atmósfera permite ver más allá del horizonte geométrico.



BRUNO VACARO

HORIZONTE ÓPTICO

EN LA ATMÓSFERA, debido a las variaciones de densidad que experimenta el aire en función de la altitud, los rayos de luz no se propagan en línea recta. Las capas de aire cercanas al suelo son más densas, por lo que la luz avanza más despacio en ellas. Ese cambio en la velocidad de propagación en función de la altitud provoca que los rayos de luz se curven hacia abajo, lo que permite ver más allá del horizonte geométrico. En el caso ilustrado aquí, el observador *O* puede ver el punto *P'*. Si la luz se propagase en línea recta, la curvatura de la Tierra solo le permitiría ver el punto *P*.



en un momento dado tras su emisión), es perpendicular a los rayos de luz. Supongamos que, inicialmente, la luz se propaga siguiendo una línea horizontal. Dado que la densidad del aire es mayor en las capas más bajas de la atmósfera, en ellas el índice de refracción es también mayor, por lo que la luz viajará más despacio en ellas. Como consecuencia, la parte más alta de un frente de onda se adelantará a la más baja, por lo que el frente se inclinará. Eso significa que los rayos luminosos se desvían hacia abajo.

No deja de ser notable que una diferencia tan pequeña entre el índice de refracción del aire en el vacío y al nivel del suelo cause un efecto tan importante en la distancia al horizonte

Evaluemos cuantitativamente este efecto. Para la luz visible, el índice de refracción del aire al nivel del suelo asciende por lo general a 1,0003. Eso implica que, con respecto a su propagación en el vacío, la onda se retrasa 3×10^{-4} kilómetros (30 centímetros) por kilómetro recorrido. Si imaginamos una onda que se extiende desde el suelo hasta el cuasivacío reinante a, digamos, unos ocho kilómetros de altitud, obtenemos una inclinación de $3{,}75 \times 10^{-5}$ radianes por kilómetro recorrido.

Este valor nos indica cuánto se desvían hacia abajo los rayos de luz. Dicha desviación es cuatro veces menor que el ángulo de curvatura asociado a la forma redonda de la Tierra, el cual asciende a $2\pi/(40.000\text{ km})$; es decir, $1{,}5 \times 10^{-4}$ radianes por kilómetro. Pero, aun así, significa que los rayos de luz se ciñen parcialmente a la forma de la Tierra. Al final, el efecto es el mismo que tendría lugar si el radio terrestre fuera un 33 por ciento mayor, en cuyo caso la distancia al horizonte (proporcional a la raíz cuadrada de ese radio) aumentaría en más de un 15 por ciento. No deja de ser notable que una diferencia tan pequeña entre el índice de refracción del aire en el vacío y al nivel del suelo cause un efecto tan importante en la distancia al horizonte.

Sin embargo, y aunque este fenómeno contribuye sin duda al avistamiento del Canigó desde Marsella, no basta para explicar las observaciones del lago Bourget. En este caso, es necesario que el índice de refracción (y, por tanto, la densidad del aire) disminuya más rápidamente con la altitud y que la trayectoria de los rayos de luz se curve aún más.

Inversión térmica

Cerca del suelo y a temperatura constante, el cambio de presión debido únicamente al peso de las capas de aire superiores viene a ser del 0,012 por ciento por metro. Puede verse que esta variación nos vuelve a dar la desviación calculada anteriormente de $3{,}75 \times 10^{-5}$ radianes por kilómetro. Sin embargo, hay otro factor que también interviene: la temperatura, la cual es inversamente proporcional a la densidad. Por tanto, si la temperatura aumenta con la altitud, la densidad disminuirá aún más y el efecto óptico será mayor. En meteorología, dicho fenómeno se conoce como inversión térmica.

Para que la trayectoria de los rayos de luz se ajustase a la forma de la Tierra y se llevara el horizonte hasta el infinito, tendríamos que multiplicar por cuatro nuestra desviación estimada para que esta compensara exactamente el efecto de la curvatura de la Tierra. En tal caso, la variación relativa de temperatura tendría que ser tres veces mayor que la variación relativa de presión. Eso implicaría un aumento de 0,11 grados centígrados por metro de altitud.

Este valor es excepcional e imposible de alcanzar en extensiones de cientos de kilómetros. Sin embargo, puede darse en escalas menores. Tal es justamente el caso de un lago, donde un aire recalentado y poco agitado por el viento se halla en contacto con un agua que permanece fresca. En la situación descrita por nuestro corresponsal, el horizonte crecía, pero no hasta el infinito. Por tanto, la variación relativa de temperatura sobre la superficie del lago Bourget tenía que ser inferior al umbral que acabamos de mencionar. En caso de haber sido mayor, habrían podido observarse efectos similares a los espejismos marinos, las fatamorganas, y la tapia se habría mostrado en el aire e invertida, como un «buque fantasma».

PARA SABER MÁS

How far away is the horizon? Anthony P. French en *American Journal of Physics*, vol. 50, págs. 795-799, septiembre de 1982.

Newton's theory of the atmospheric refraction of light. Michael Nauenberg en *American Journal of Physics*, vol. 85, págs. 921-925, diciembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Topología de los espejismos. Walter Tape en *IyC*, agosto de 1985.

BRUNO VACARO

por Jean-Paul Delahaye

Jean-Paul Delahaye es profesor emérito de la Universidad de Lille y miembro del Centro de Investigación en Informática, Señal y Automática de Lille.



Los secretos del número 42

De cómo un número totalmente ordinario atrajo la atención de los amantes de la ciencia ficción, la informática... e incluso de los matemáticos

GETTY IMAGES/PAPPARAFFIE/ISTOCK

Todos sentimos fascinación por los misterios sin resolver, como las muertes o desapariciones inexplicables. Y eso sucede incluso cuando el misterio se basa en una broma, como en el caso de la novela de ciencia ficción *La guía del autoestopista galáctico*, escrita por Douglas Adams en 1979. Este libro, el primero de una serie de cinco, nos habla de un superordenador que, tras calcular durante 7,5 millones de años, revela que la respuesta a la gran pregunta sobre la vida, el universo y todo lo demás es 42.

Los personajes que reciben esa contestación se desesperan porque no resulta muy útil, pero la computadora les hace ver que no habían formulado la pregunta de manera precisa. Para dar con el enunciado correcto de la pregunta cuya respuesta es 42, el ordenador necesitará construir una nueva versión de sí mismo, y eso le llevará tiempo. Esa nueva versión es la Tierra... y para saber qué pasa después, tendrá que leer las obras de Adams.

La elección del número 42 por parte del autor se ha convertido en un elemento central de la «cultura friki», y ha originado multitud de bromas o guiños que intercambian los iniciados. Por ejemplo, si le consultamos a nuestro motor de búsqueda (ya sea en español o en inglés) cuál es la respuesta a la «gran pregunta de la vida, el universo y todo lo demás», es muy probable que conteste «42». Así ocurre con Google, Qwant, Wolfram Alpha (especializado en problemas de cálculo matemático) e incluso el bot conversacional Clerverbot.

Parece evidente que el nombre de las «escuelas 42», una red de academias de informática fundada en 2013 y presente en diversos países, es un homenaje a las novelas de Douglas Adams. El 42 también hace varias apariciones en la película *Spider-Man: Un nuevo universo*. Y estas son solo dos de las cuantiosas referencias y alusiones al número 42.

Además, hay toda una serie de coincidencias casuales a las que no merece la pena buscar sentido:

- En la mitología egipcia, durante el juicio de Osiris, los muertos debían enunciar ante 42 jueces 42 pecados que no habían cometido.

- La distancia que se corre en una maratón es de 42,195 kilómetros porque es la que se supone que cubrió el mensajero griego Filípedes, en el año 490 a.C., entre Maratón y Atenas para anunciar la victoria sobre los persas.
- En el antiguo Tíbet hubo 42 emperadores, desde Nyatri Tsenpo, que reinó en torno al 127 a.C., hasta Langdarma, que lo hizo del año 836 al 842.
- Y la biblia de Gutenberg, el primer libro impreso en Europa, tiene 42 líneas de texto por columna, por lo que también se la conoce como «biblia de cuarenta y dos líneas».

Una elección arbitraria

Muchos se preguntaron si el uso del 42 en la novela de Douglas Adams tenía algún significado especial. La respuesta del autor fue tajante: «Era una broma. Tenía que ser un número, un número corriente y más bien pequeño, y escogí ese. Lo de las representaciones binarias, la base 13 y los monjes tibetanos es un disparate. Me senté en mi escritorio, miré al jardín y pensé "42 servirá". Y lo escribí.»

La mención al sistema binario alude a que, en base 2, el número 42 adopta una forma muy simple, 101010. Eso llevó a algunos entusiastas a celebrar el 10 de octubre de 2010 (10/10/10).

La conexión con la base 13 no es tan directa. En un momento dado, la serie de novelas sugiere que 42 podría ser la respuesta a la pregunta «¿cuál es el resultado de multiplicar 6 por 9?». Algo absurdo, ya que $6 \times 9 = 54$... pero el número que se escribe «42» en base 13 es justamente $4 \times 13 + 2 = 54$.

Más allá de las ocurrencias con las que han bromeado los informáticos y de las inevitables apariciones del 42 a lo largo de la historia o del mundo, cabe preguntarse si ese número es especial desde un punto de vista estrictamente matemático.

¿Matemáticamente especial?

El número 42 tiene algunas propiedades matemáticas destacables.

Por ejemplo, es la suma de las tres primeras potencias de 2 con exponente impar:

$$2^1 + 2^3 + 2^5 = 42.$$

La sucesión $a(n)$ de las sumas de potencias impares de 2 es la secuencia A020988 de la *Enciclopedia electrónica de sucesiones enteras* de Neil Sloane. En base 2, su enésimo elemento se escribe 1010...10, con «10» repetido n veces, y su fórmula es

$$a(n) = (2/3)(4^n - 1).$$

Cuando n aumenta, la frecuencia de estos números tiende a cero, lo que implica que son muy inusuales.

Nuestro número también es la suma de las dos primeras potencias de 6 de exponente no nulo:

$$6^1 + 6^2 = 42.$$

La sucesión $b(n)$ de las sumas de potencias de 6 es la secuencia A105281 de la enciclopedia de Sloane. Está definida por las fórmulas

$$b(0) = 0,$$
$$b(n) = 6b(n-1) + 6.$$

La frecuencia de estos números también tiende a 0 cuando n tiende a infinito.

Además, el 42 es un número de Catalan. El primero que hizo mención a estos números (con otro nombre) fue Leonhard Euler, al preguntarse de cuántas formas distintas se podía dividir en triángulos un polígono convexo de $n + 2$ lados usando diagonales que no se cortasen. Los números de Catalan forman la sucesión

$$1, 1, 2, 5, 14, 42, 132...$$

(A000108 en la enciclopedia de Sloane), cuyo enésimo término viene dado por

$$c(n) = (2n)!/(n!(n+1)!).$$

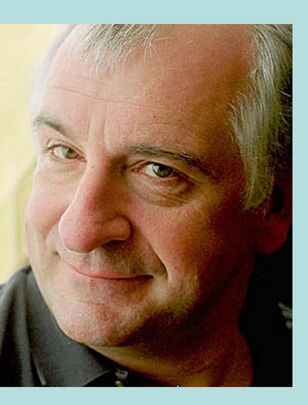
De nuevo, la frecuencia de estos números tiende a cero en el infinito.

Los números de Catalan se llaman así en honor al matemático franco-belga Eugène Charles Catalan (1814-1894), quien descubrió que $c(n)$ es el número de formas de organizar n pares de paréntesis respetando las reglas habituales: un par no puede cerrarse si no se ha abierto previamente, ni hasta que se cierren todos los paréntesis abiertos después que él. Así, $c(3) = 5$ porque las posibles disposiciones de 3 pares de paréntesis son

$$((())),\ ()()(),$$
$$(())(),\ (()()),\ ()(()).$$

EL MITO DEL NÚMERO 42

A continuación se muestra un extracto del capítulo 27 de la *Guía del autoestopista galáctico* de Douglas Adams, donde aparece el famoso número 42 que se ha convertido en fetiche de aficionados a la ciencia ficción e informáticos de todo el mundo:



Douglas Adams (1952-2001)

—¿Y estás dispuesto a dárnosla? —le apremió Loonquawl.
—Lo estoy.
—¿Ahora mismo?
—Ahora mismo —contestó Pensamiento Profundo.
Ambos se pasaron la lengua por los labios secos.
—Aunque no creo —añadió Pensamiento Profundo— que vaya a gustaros.
—¡No importa! —exclamó Phouchg—. ¡Tenemos que saberla! ¡Ahora mismo!
—¿Ahora mismo? —inquirió Pensamiento Profundo.
—¡Sí! Ahora mismo...
—Muy bien —dijo el ordenador, volviendo a guardar silencio.
Los dos hombres se agitaron inquietos. La tensión era insoportable.
—En serio, no os va a gustar —observó Pensamiento Profundo.
—¡Dínosla!
—De acuerdo —dijo Pensamiento Profundo—. La Respuesta a la Gran Pregunta...
—¡Sí...!
—... de la Vida, del Universo y de Todo... —dijo Pensamiento Profundo.
—¡Sí...!
—Es... —dijo Pensamiento Profundo, haciendo una pausa.
—¡Sí...!
—Es...
—iii... ¿Sí...?!!!
—Cuarenta y dos —dijo Pensamiento Profundo, con calma y majestad infinitas.

El valor de $c(n)$ también da el número de árboles binarios de $n+1$ hojas. Y el de posibles caminos que, manteniéndose en todo momento por debajo de la diagonal y moviéndose siempre a la derecha o hacia arriba, ascienden desde la esquina inferior izquierda a la superior derecha de una cuadrícula (*veáse el recuadro* «Los números de Catalan»). Esta última propiedad nos permite visualizar la definición por recurrencia de la sucesión de Catalan:

$$c(0) = 1,$$
$$c(n+1) = \sum_{k=0}^{n} c(k)c(n-k) \ .$$

Para calcular el número de caminos en el caso de una cuadrícula de lado $n+1$, podemos construir sobre ella dos cuadrículas, una de tamaño $k < n+1$ con vértice inferior izquierdo en $(0,0)$ y superior derecho en (k,k), y otra de tamaño $n-k$ con vértices en (k,k) y (n,n). La primera de esas cuadrículas contribuye con $c(k)$ posibles caminos y la segunda con $c(n-k)$. Variando k desde 0 hasta n, obtenemos todos los posibles caminos para la cuadrícula de lado $n+1$.

Finalmente, el 42 es un número «práctico», lo cual quiere decir que todo entero comprendido entre 1 y 42 puede obtenerse sumando algunos de los divisores de este último (sin repetirlos). Los primeros números prácticos son

1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 18, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 40, 42, 48, 54, 56, 60, 64, 66, 72...

(secuencia A005153 de Sloane). No conocemos ninguna fórmula sencilla que genere el enésimo término de esta sucesión, y la frecuencia de sus términos parece tener un límite positivo.

Todo esto resulta divertido, pero no convierte al 42 en un número excepcional desde el punto de vista matemático. El 41 o el 43, por ejemplo, también aparecen en muchas secuencias.

¿Cómo podemos saber qué números son especialmente interesantes o anodinos? Ese es un problema que he estudiado junto a Nicolas Gauvrit y Héctor Zenil a partir de las sucesiones de la enciclopedia de Sloane. En nuestro trabajo, además de establecer un vínculo teórico con la complejidad de Kolmogórov (los números interesantes serían aquellos que se pueden describir de manera sencilla), desvelamos un efecto cultural en la frecuencia con que aparece cada número en la enciclopedia de Sloane, que, por lo tanto, no es solo un compendio basado en la pura objetividad matemática [*veáse* «La brecha de Sloane», por Bartolo Luque. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2014].

LOS NÚMEROS DE CATALAN

Los números de Catalan son muy infrecuentes, mucho más que los números primos: solo catorce de ellos son inferiores a 1000 millones. Su secuencia comienza así:

1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, 16.796, 58.786, 208.012, 742.900, 2.674.440, 9.694.845, 35.357.670, 129.644.790, 477.638.700, 1.767.263.190, 6.564.120.420, 24.466.267.020, 91.482.563.640, 343.059.613.650, 1.289.904.147.324, 4.861.946.401.452, 18.367.353.072.152, 69.533.550.916.004, 263.747.951.750.360...

El 42 es el número de Catalan $c(5)$. En particular, eso significa que hay 42 formas de colocar correctamente 5 pares de paréntesis (*a, página siguiente*), de modo que un par nunca se cierre antes de haberse abierto ni hasta que se hayan cerrado todos los paréntesis abiertos después que él. También implica que, si tenemos una cuadrícula de 5 × 5 y queremos ir desde la esquina inferior izquierda a la superior derecha siguiendo los lados de las casillas y sin cortar la diagonal, bajar ni retroceder, hay 42 trayectorias distintas (*b*). Asimismo, 42 es el número de árboles binarios de 6 hojas (*c*), de formas de recubrir con rectángulos el lateral de una escalera de 5 peldaños (*d*) y de maneras de dividir un heptágono regular en 5 triángulos mediante diagonales que no se cortan entre sí (*e*).

Sumas de tres cubos

Los informáticos y los matemáticos conocen el atractivo del 42, pero siempre han pensado que se trata de un simple juego que podríamos repetir con cualquier otro número. Sin embargo, acabemos añadiendo un descubrimiento reciente que les mantuvo entretenidos un tiempo. El número 42 ha sido el entero positivo inferior a 100 que ha dado más quebraderos de cabeza en el problema de los tres cubos, el cual plantea lo siguiente:

¿Qué números enteros n pueden escribirse como la suma de tres cubos de enteros, $n = a^3 + b^3 + c^3$? Y, para esos números, ¿cómo encontrar a, b y c?

La dificultad reside en que el cubo de un número entero puede ser negativo. Eso hace que el espacio de los tripletes (a, b, c) que debemos explorar sea infinito, a diferencia de lo que ocurre con las sumas de cuadrados (donde, para un cierto n, solo hay que considerar los enteros cuyo valor absoluto es menor que $\sqrt{n}$). Además, para las sumas de cuadrados sabemos muy bien lo que es posible o imposible.

En las sumas de cubos, algunas soluciones pueden ser sorprendentemente grandes, como la que se descubrió en 2007 para el número 156:

$$156 = 26.577.110.807.569^3 + (-18.161.093.358.005)^3 + (-23.381.515.025.762)^3.$$

Lo primero que hay que tener en cuenta en relación con las sumas de tres cubos es que, para ciertos valores enteros de n, la ecuación $n = a^3 + b^3 + c^3$ no tiene solución. Eso es lo que sucede con todos los n de la forma $9m + 4$ o $9m + 5$ (por ejemplo, 4, 5, 13, 14, 22 o 23).

La demostración de esta afirmación es muy sencilla si empleamos la aritmética «módulo 9», lo que supone asumir que $9 = 0$ y limitarse a manipular los números entre 0 y 8, o entre -4 y 4.

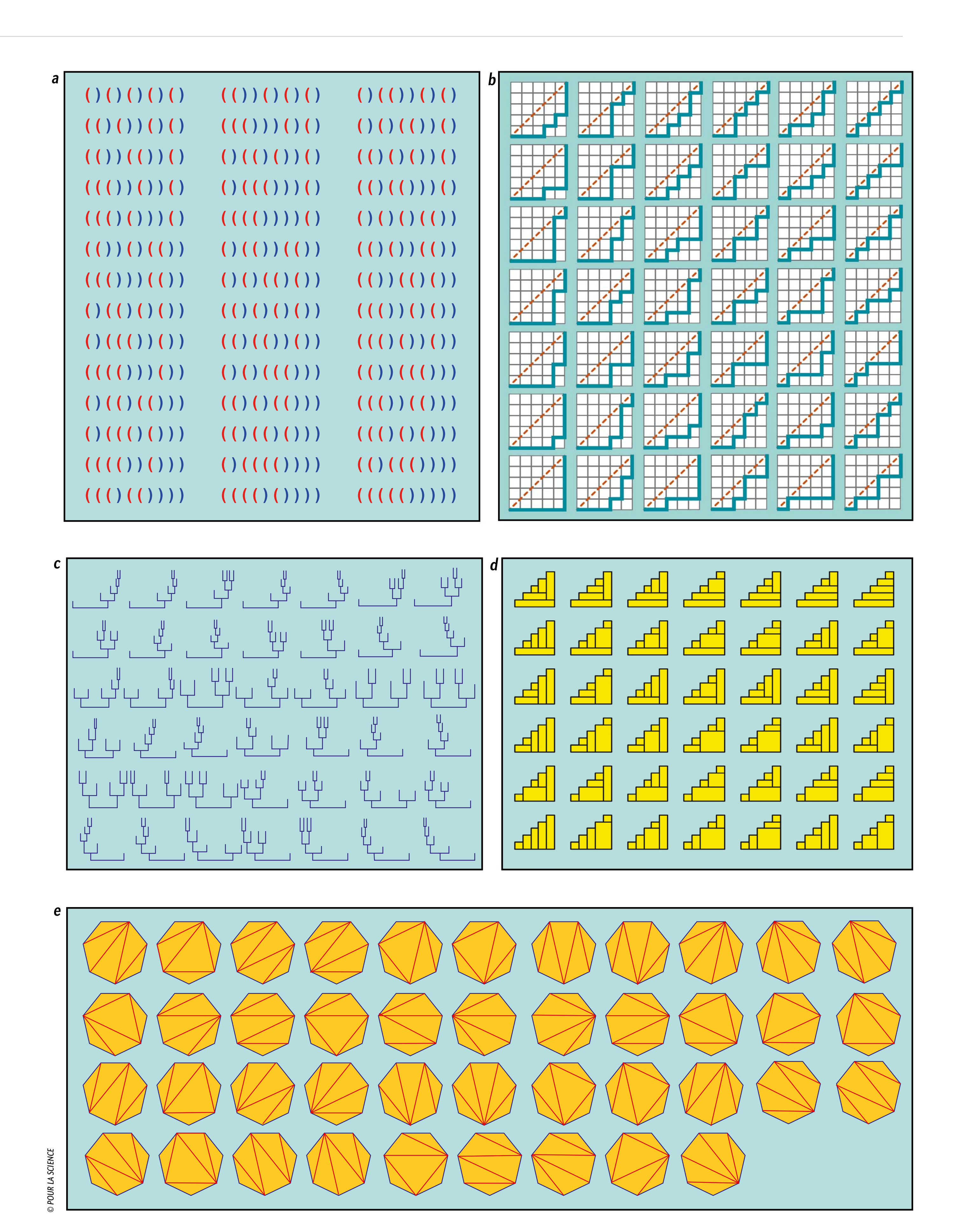
Comencemos observando que, en módulo 9,

$$0^3 = 0,$$
$$1^3 = 1,$$
$$2^3 = 8 = -1,$$
$$3^3 = 27 = 0,$$
$$4^3 = 64 = 1,$$
$$5^3 = (-4)^3 = -64 = -1,$$
$$6^3 = (-3)^3 = 0,$$
$$7^3 = (-2)^3 = 1,$$
$$8^3 = (-1)^3 = -1.$$

(Para obtener estas relaciones, sumamos o restamos múltiplos de 9 hasta obtener un número entre -4 y 4; por ejemplo, $-64 + 7 \times 9 = -1$.)

En otras palabras, en módulo 9, el cubo de un entero solo puede ser -1 (=8), 0 o 1. La suma de tres números de entre 0, 1 y -1 puede tomar los siguientes valores:

$$0 = 0 + 0 + 0 = 0 + 1 + (-1),$$


a
b
c
d
e

$$1 = 1 + 0 + 0 = 1 + 1 + (-1),$$
$$2 = 1 + 1 + 0,$$
$$3 = 1 + 1 + 1,$$
$$6 = -3 = (-1) + (-1) + (-1),$$
$$7 = -2 = (-1) + (-1) + 0,$$
$$8 = -1 = (-1) + 0 + 0 = 1 + (-1) + (-1),$$

pero nunca 4 o 5 (=−4). Eso significa que las sumas de tres cubos nunca producen números de la forma $n = 9m + 4$ o $n = 9m + 5$, a los que nos referiremos como valores prohibidos.

Búsqueda de soluciones

Para ilustrar hasta qué punto es complicado encontrar soluciones de la ecuación $n = a^3 + b^3 + c^3$, consideremos los casos $n = 1$ y $n = 2$. Para $n = 1$, tenemos la solución obvia

$$1^3 + 1^3 + (-1)^3 = 1.$$

¿Hay otras? En efecto:

$$9^3 + (-6)^3 + (-8)^3 = 729 - 216 - 512 = 1.$$

Y no es la única, porque, en 1936, Kurt Mahler propuso una infinidad de soluciones. Para todo entero p,

$$(9p^4)^3 + (3p - 9p^4)^3 + (1 - 9p^3)^3 = 1,$$

resultado que se puede probar a partir de la identidad

$$(A + B)^3 = A^3 + 3A^2B + 3AB^2 + B^3.$$

También existe un conjunto infinito de soluciones para $n = 2$, hallado en 1908 por A. S. Werebrusov. Para todo entero p,

$$(6p^3 + 1)^3 + (1 - 6p^3)^3 + (-6p^2)^3 = 2.$$

Multiplicando cada término de estas igualdades por el cubo de un número entero, r^3, deducimos que también hay infinitas soluciones para el cubo y el doble del cubo de un entero. Para 16, por ejemplo, que es el doble del cubo de 2, tenemos

$$14^3 + (-10)^3 + (-12)^3 = 16$$

(multiplicando la relación de Werebrusov por 2^3 y usando $p = 1$).

Por último, apuntemos que hasta agosto de 2019 solo se conocían dos soluciones para $n = 3$:

$$1^3 + 1^3 + 1^3 = 3,$$
$$4^3 + 4^3 + (-5)^3 = 3.$$

Estas consideraciones nos llevan a la siguiente pregunta: ¿hay soluciones para todos valores no prohibidos de n?

Los ordenadores al rescate

Para responder esa cuestion, hay que tomar la sucesión de valores no prohibidos

1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16...

(A060464 en la enciclopedia de Sloane) y examinarlos uno por uno. Si tenemos éxito con todos los números estudiados, es razonable conjeturar que existen soluciones a la ecuación $n = a^3 + b^3 + c^3$ para cualquier entero n que no sea de la forma $n = 9m + 4$ o $n = 9m + 5$.

Las investigaciones, que dependen de la potencia de los ordenadores em-

EL PROBLEMA DE LOS TRES CUBOS

A principios de septiembre de 2019, el 42 era el menor entero positivo, y el único inferior a 100, que no sabíamos expresar como la suma de tres cubos de números enteros. Andrew Booker, de la Universidad de Bristol, y Andrew Sutherland, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, emplearon el programa de computación distribuida Charity Engine para realizar un enorme cálculo numérico que se habría alargado durante más de un millón de horas en un ordenador de sobremesa corriente. Y encontraron una solución:

$$42 = (-80.538.738.812.075.974)^3 + 80.435.758.145.817.515^3 + 12.602.123.297.335.631^3.$$

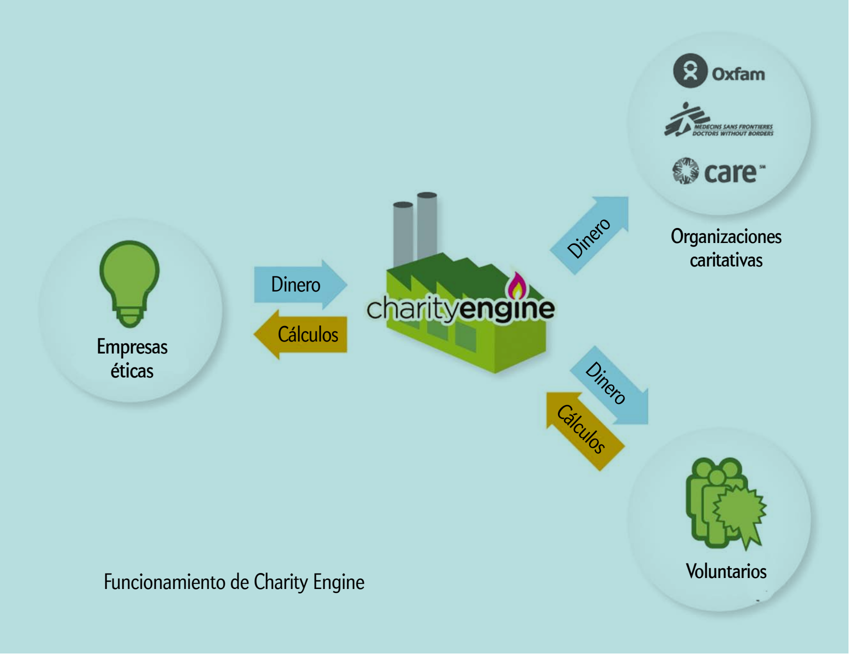
El sistema de cálculo Charity Engine coordina más de 500.000 ordenadores de voluntarios y usa sus recursos en los momentos en que sus dueños no los utilizan, lo que permite realizar grandes cálculos con un menor coste. Charity Engine se basa en un programa de la Universidad de Berkeley y está gestionado por la empresa Worldwide Computer Company.

La potencia computacional sobrante de los ordenadores del proyecto se vende a universidades y empresas, y las ganancias se donan a organizaciones caritativas o se reparten entre quienes participan en la red mediante sorteos periódicos. La capacidad de cómputo que no se compra se asigna a proyectos informáticos de diversa índole.

El mismo método también condujo al descubrimiento de una expresión inesperada para el número 3 como la suma de tres cubos:

$$3 = (-472.715.493.453.327.032)^3 + (-569.936.821.113.563.493.509)^3 + 569.936.821.221.962.380.720^3.$$

Los únicos números naturales menores de 1000 que aún no sabemos si pueden descomponerse en la suma de tres cubos son 114, 390, 579, 627, 633, 732, 921 y 975.



Funcionamiento de Charity Engine

SUMAS DE CUADRADOS

Hasta septiembre de 2019 no supimos que el número 42 era la suma de tres cubos de números enteros. Estas sumas son difíciles de manejar porque los cubos pueden ser negativos. En cambio, las sumas de cuadrados de enteros, que interesan a los matemáticos desde la Antigüedad, se conocen a la perfección. He aquí algunos resultados sobre ellas.

Sumas de dos cuadrados

Un número primo impar es la suma de dos cuadrados de números enteros si y solo si es de la forma $4k + 1$. En tal caso, la descomposición en la suma de dos cuadrados es única. Por ejemplo, $5 = 1^2 + 2^2$, $13 = 2^2 + 3^2$ o $17 = 1^2 + 4^2$.

Además, un número natural n es la suma de dos cuadrados si y solo si en su descomposición en factores primos no hay ningún término de la forma $4k + 3$ con un exponente impar. Por ejemplo, $45 = 3^2 \times 5 = 6^2 + 3^2$. En la descomposición de 45 en factores primos, 3 (que es de la forma $4k + 3$) aparece con exponente par. Por lo tanto, el número 45 satisface la condición del teorema y se puede escribir como la suma de dos cuadrados.



Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813), en un grabado de Antonio Dalcò.

Sumas de tres cuadrados

Todos los números naturales pueden representarse como la suma de tres cuadrados enteros, excepto los que tienen la forma $4^k(8n + 7)$, con k y n enteros no negativos.

Sumas de cuatro cuadrados

Cualquier número natural puede escribirse como la suma de cuatro cuadrados enteros. Este magnífico teorema lo demostraron Lagrange en 1770 y Euler en 1772.

pleados, han ido aportando cada vez más resultados, que nos llevan de nuevo al famoso e intrigante número 42.

En 2009, Andreas-Stephan Elsenhans y Jörg Jahnel examinaron todos los tripletes de enteros (a, b, c) con valor absoluto menor que 10^{14} (usando un método propuesto por Noam Elkies en el año 2000) con el objetivo de buscar soluciones para los números n entre 1 y 1000. Su artículo demostró la existencia de soluciones para todos los números inferiores a 1000, excepto

33, 42, 74, 114, 165, 390, 579, 627, 633, 732, 795, 906, 921, 975.

De entre los menores de 100, solo quedaron tres incógnitas: 33, 42 y 74.

En 2016, Sander Huisman dio un paso más y halló una solución para el 74:

$$74 = (-284.650.292.555.885)^3 + 66.229.832.190.556^3 + 283.450.105.697.727^3.$$

Y, en marzo de 2019, Andrew Booker hizo lo propio con el 33:

$$33 = 8.866.128.975.287.528^3 + (-8.778.405.442.862.239)^3 + (-2.736.111.468.807.040)^3.$$

El número de Douglas Adams se convirtió en el último entero positivo inferior a 100 que no se sabía expresar como la suma de tres cubos de enteros. Si no existiese ninguna solución, habría una razón matemática de peso para conceder importancia al 42: sería el primer número no prohibido que no admite una descomposición en la suma de tres cubos. Pero los ordenadores iban a frustrar esa pequeña esperanza.

El hallazgo llegó en septiembre de 2019, tras un cómputo colosal coordinado por Andrew Booker y Andrew Sutherland. Los ordenadores personales que integran la red Charity Engine aportaron el equivalente a más de un millón de horas de cálculo para descubrir que

$$42 = (-80.538.738.812.075.974)^3 + 80.435.758.145.817.515^3 + 12.602.123.297.335.631^3.$$

Los casos del 165, el 795 y el 906 también se han resuelto hace poco, así que los únicos enteros positivos menores de 1000 que se resisten son

114, 390, 579, 627, 633, 732, 921, 975.

Por lo tanto, la conjetura de que existen soluciones para todos los n que no son de la forma $9m + 4$ o $9m + 5$ parece confirmarse.

En 1992, Roger Heath-Brown propuso una conjetura más fuerte que afirma que hay infinitas formas de escribir todos los n no prohibidos como suma de tres cubos. Así que aún queda mucho por hacer.

La enorme dificultad del problema nos lleva a plantearnos si la pregunta «¿es n la suma de tres cubos?» podría ser indecidible: tal vez no haya ningún algoritmo (por eficiente que sea) capaz de procesar todos los casos posibles. Eso es lo que ocurre, por ejemplo, con el problema de la parada: en 1936, Alan Turing demostró que ningún algoritmo puede resolverlo para todos los posibles programas informáticos [*véase* «La ciencia después de Alan Turing», colección Temas, n.º 68, 2012]. Pero nuestra pregunta se enmarca en un dominio puramente numérico muy fácil de describir, por lo que probar su indecidibilidad constituiría toda una novedad.

El número 42 dio algunos problemas, ¡pero no es el final de la historia!

PARA SABER MÁS

Guía del autoestopista galáctico. Douglas Adams. Anagrama, 2008.

New sums of three cubes. Andreas-Stephan Elsenhans y Jörg Jahnel en *Mathematics of Computation*, vol. 78, n.º 266, págs. 1227-1230, abril de 2009.

Newer sums of three cubes. Sander G. Huisman en arXiv:1604.07746, abril de 2016.

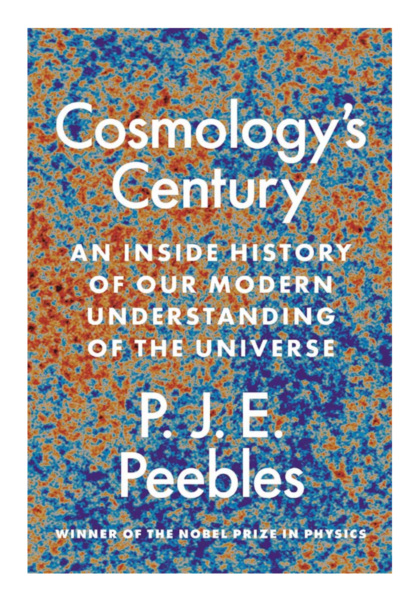
Cracking the problem with 33. Andrew R. Booker en *Research in Number Theory*, vol. 5, art. 26, julio de 2019.

On a question of Mordell. Andrew R. Booker y Andrew V. Sutherland en arXiv:2007.01209, julio de 2020.

Página web de la *Enciclopedia electrónica de secuencias de enteros*: http://oeis.org/

EN NUESTRO ARCHIVO

Un viejo problema sobre el 42, resuelto. Lars Fischer en www.investigacionyciencia.es, 10 de septiembre de 2019.



COSMOLOGY'S CENTURY
AN INSIDE HISTORY OF OUR MODERN UNDERSTANDING OF THE UNIVERSE
P. J. E. Peebles
Princeton University Press, 2020
440 págs.

Un cuaderno de bitácora de la cosmología moderna

La historia de una de las áreas más fascinantes de la física del siglo xx contada por uno de sus protagonistas

La astronomía fue la primera de las disciplinas físicas en adquirir, ya en la antigüedad, algunas de las características que hoy consideramos inherentes a cualquier área científica: una comunidad amplia que comparte un programa de investigación común y en la que existe un elevado consenso sobre las metodologías aceptables para llevarlo a cabo. Dada su temprana madurez, no resulta sorprendente que la astronomía estuviera en el origen de la Revolución Científica, de la que acabaría emergiendo la ciencia física moderna.

Este hecho no impidió que, con posterioridad, y debido a lo particular de sus objetos de estudio, la fiabilidad de la astronomía se percibiese inferior a la de las «ciencias de laboratorio». El escritor Ambrose Bierce reflejaba esta idea cuando escribía en su satírico *Diccionario del Diablo* (1911) que un observatorio astronómico era «el lugar donde los astrónomos conjeturan como falsas las suposiciones de sus predecesores».

Este fue también el caso de la cosmología, que tomó forma como ciencia a principios del siglo xx. A pesar de los trabajos de Albert Einstein, Alexander Friedmann, Georges Lemaître y Edwin Hubble, entre otros, todavía en los años cincuenta del siglo pasado el estudio del universo primitivo se tenía por algo «a lo que no debía dedicar su tiempo un científico respetable», según el testimonio de Steven Weinberg. Esta imagen fue cambiando paulatinamente a lo largo de la segunda mitad del siglo xx, y hoy la cosmología es considerada no ya uno de los campos centrales de la física, sino también de los más activos y prometedores.

Una prueba del cambio de actitud hacia las ciencias del cosmos la aporta la creciente profusión con que, desde los años setenta, el comité Nobel está reconociendo el trabajo de astrofísicos y cosmólogos. Entre estos últimos se encuentra James Peebles, galardonado con el Nobel de física en 2019 y autor de *Cosmology's century*, una obra que traza en sus más minuciosos detalles la trayectoria histórica de la cosmología moderna. Desde el trabajo fundacional de Einstein en 1917 hasta la llamada por el autor «revolución de 1997-2003», que, con las medidas de las expansión acelerada del universo y las fluctuaciones del fondo de microondas, inauguró la era actual de la cosmología de precisión.

Peebles ha sido actor y testigo de excepción de la historia reciente de la cosmología. Pero, lejos de ser unas simples memorias científicas, *Cosmology's century* constituye un impresionante ejercicio de investigación histórica e historiográfica, en el que el conocimiento de primera mano del autor se combina con el análisis e interpretación de las fuentes. El resultado va más allá de la «historia interna» que promete el subtítulo del libro para convertirse en una verdadera intrahistoria de la cosmología en el sentido más unamuniano del término: una descripción meticulosa de los vaivenes de la actividad científica, de las múltiples ideas, corrientes de pensamiento y líneas de investigación —muchas de ellas refutadas, abandonadas o absorbidas en otras— que se esconden bajo el destilado histórico que hoy identificamos como cosmología contemporánea.

Esta visión intrahistórica pone de manifiesto algunos aspectos muy significativos del desarrollo de la disciplina que frecuentemente se escapan a un análisis histórico más superficial o meramente narrativo. Uno de ellos es el papel de las teorías refutadas como motor del progreso científico; o, en palabras del autor, cómo «las ideas equivocadas pueden ser productivas». Un ejemplo particularmente interesante, y que Peebles desarrolla con gran detalle, es el de la teoría del estado estacionario. La hipótesis básica de este modelo (que el aspecto del universo no varía con el tiempo) implica que las propiedades de las galaxias deberían ser estadísticamente independientes de su distancia a nosotros. Constatar si este era el caso supuso un importante acicate para las observaciones, que acabarían por confirmar el modelo de la gran explosión. De forma similar, explicar la existencia de los elementos químicos en un universo en el que la temperatura ha permanecido constante fue uno de los motivos que condujo a la teoría de la nucleosíntesis estelar.

Un segundo aspecto que analiza *Cosmology's century* es la importancia que la evaluación no empírica ha tenido y tiene en cosmología. La idea, articulada de forma precisa en 2013 por el filósofo Richard Dawid en el contexto de la teoría de cuerdas, ha sido una cuestión recurrente de debate en la filosofía de la ciencia de los últimos años [*véase* «Los límites del método científico»; por Adán Sus; Investigación y Ciencia, abril de 2016]. Peebles nos muestra que los criterios no empíricos no solo han resultado cruciales en muchos momentos del desarrollo de la disciplina, sino que han moldeado su historia. Un ejemplo lo encontramos en la importancia que la idea de un universo homogéneo mantuvo desde su formulación por Einstein, a pesar de que durante largo tiempo las pruebas observacionales fueron, cuando menos, poco concluyentes, sin llegar a descartar por completo otras alternativas hasta el descubrimiento del fondo cósmico de microondas en los años sesenta.

De todo lo dicho hasta aquí queda claro que *Cosmology's century* no es una narrativa histórica al estilo de obras como *The cosmic century*, de Malcolm Longair (Cambridge University Press, 2006), o *Concep-*

tions of cosmos, de Helge Kragh (Oxford University Press, 2006). Antes al contrario, la intención del autor es construir un auténtico cuaderno de bitácora de la cosmología del siglo xx y los primeros años del xxi. Esto se refleja en la propia estructura del libro, que, en lugar de seguir un orden cronológico global, aborda la historia de los diferentes temas de investigación (modelos cosmológicos, fondo de microondas, materia oscura, formación de estructura, etcétera) de forma paralela en capítulos independientes aunque interconectados.

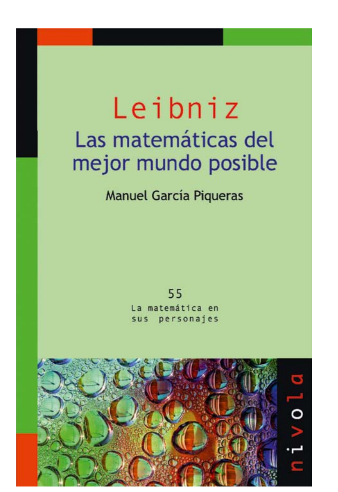
Tras su viaje por la historia de la cosmología moderna, Peebles concluye con unas profundas reflexiones sobre la práctica de la investigación científica. Reflexiones que, además de servir de colofón al libro, lo esclarecen en su conjunto. A la luz de los capítulos anteriores, se muestra cómo la aceptación de ciertas ideas dentro del marco descriptivo de la cosmología no siempre ha seguido el camino que sugeriría una aplicación ideal del método científico «de libro». En este proceso han desempeñado un importante papel elementos tanto psicológicos como sociológicos y de valoración colectiva. Se resalta, asimismo, el papel clave que ha tenido el desarrollo tecnológico en el progreso de nuestro conocimiento del universo.

Peebles ha abierto una interesante perspectiva histórica en nuestro intento de dar respuesta científica a algunas de las preguntas más fundamentales jamás planteadas por el ser humano

Estas ideas se ilustran con un interesante ejercicio de historia contrafactual en el que se plantea la cuestión de cómo se hubiera desarrollado la cosmología «si Einstein hubiera decidido ser músico». En este caso, todo nuestro conocimiento teórico del cosmos se habría basado en la gravedad newtoniana y en la relatividad especial, que el autor considera que habría sido formulada en cualquier caso en los primeros años del siglo xx. Además, la idea del universo homogéneo, de haber aparecido, habría carecido probablemente del prestigio intelectual que tuvo en nuestra «línea temporal». La historia alternativa que Peebles construye a partir de tales presupuestos no carece en absoluto de plausibilidad y sirve de experimento imaginario con el que poner a prueba sus puntos de vista acerca del papel que tanto la tecnología como los propios individuos y la colectividad científica ha desempeñado en el desarrollo de la cosmología.

Cosmology's century bien puede convertirse en una referencia básica para entender la historia de una de las áreas más fascinantes de la física del siglo xx. Con todo, es necesario advertir al lector potencial de que no va a encontrar una lectura fácil. No se trata de una obra de divulgación ni de un texto introductorio de cosmología, sino que presupone un conocimiento profundo de esta disciplina a un nivel tanto conceptual como matemático. Peebles no ha escrito un libro dirigido al gran público, sino a sus colegas de profesión y a los historiadores de la ciencia. Con ello, ha abierto también una interesante perspectiva histórica en nuestro intento de dar respuesta científica a algunas de las preguntas más fundamentales jamás planteadas por el ser humano.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca



LEIBNIZ
LAS MATEMÁTICAS DEL MEJOR MUNDO POSIBLE

Manuel García Piqueras
Nivola, 2020
200 págs.

El último genio universal

Un recorrido divulgativo del pensamiento de Leibniz con interés para historiadores, profesores, estudiantes y el público general

Gottfried Wilhelm Leibniz fue un sabio universal de espíritu fáustico; eminente jurista, filólogo, historiador, teólogo, inventor, diplomático, naturalista y físico, y egregio en todas las ramas del saber, sobre todo en filosofía y matemáticas. Con inusitada capacidad para trabajar en todo lugar, momento y condición, Leibniz aunaba lectura, pensamiento y escritura en una vida errabunda, plena de actividad social, en la que su excepcional talento, su carácter afable y optimista, su don de gentes y su poliglotía le relacionaron con los personajes más ilustres de Europa.

La filosofía natural le llevó a estudiar matemáticas. Bajo la orientación de Huygens leyó con fascinación a los grandes matemáticos del siglo xvii, y con Fermat, Descartes y Pascal alcanzó el éxtasis mental. Persiguió la idea de Ramon Lull de un lenguaje simbólico universal para expresar todo pensamiento sin ambigüedades y resolver mediante el cálculo y la lógica toda polémica o contencioso, lo que puede entenderse como un antecedente de la lógica matemática de Boole y Russell.

Como artífice de notaciones perennes, Leibniz creó un universo matemático donde símbolos y términos eran el soporte de conceptos y métodos. Destacan los índices como números para indicar la posición, que Leibniz aplicó con genio a la combinatoria, a famosas series infinitas y a la idea de determinante. Pero fue en el cálculo infinitesimal donde Leibniz, junto

con Newton, dejó una huella eterna, al reducir la ingente casuística de técnicas para resolver problemas geométricos a un cálculo operacional, que unificaba los distintos métodos y que resolvía de modo uniforme los problemas, con eficaces algoritmos universales independientes de la estructura geométrica. Para Leibniz, la tangente a una curva dependía de la razón entre las diferencias infinitesimales de ordenadas y abscisas, y el área dependía de la suma de los rectángulos infinitesimales que componen una figura. La amplitud intelectual de Leibniz podría proceder de muchos pensadores, y lo que hizo en cada campo del saber podía haber llenado toda la vida de un solo sabio [*véase* «El arte de editar a Leibniz», por Eberhard Knobloch; Investigación y Ciencia, mayo de 2013].

En *Leibniz: Las matemáticas del mejor mundo posible*, Manuel García Piqueras, matemático de la Universidad de Castilla-La Mancha, nos da a conocer buena parte del pensamiento de este genio universal, tanto desde el punto de vista de sus obras, correspondencias o artículos, como en relación con los personajes que influyeron en su creatividad, sus constantes viajes por Europa y su influencia ulterior en la filosofía, la ciencia y la tecnología. Todo ello auxiliado por una copiosa cantidad de notas y una amplia bibliografía. Al tomar como referencia las ramas matemáticas que aparecieron en el siglo xx, el autor ha seleccionado las partes de la obra leibniziana que se consideran de mayor interés para construir cada capítulo. Los resultados se presentan sin excesiva carga matemática, lo que permite que un estudiante de bachillerato pueda seguir sin dificultades el hilo de la argumentación.

Leibniz anunció en 1671 dos máquinas que había imaginado: una para la aritmética y otra para la geometría. La primera se proponía realizar las cuatro operaciones básicas de manera mecánica. La segunda anunciaba una nueva forma para determinar ecuaciones analíticas y las proporciones y transformaciones de figuras sin tablas, cálculo o el dibujo de líneas. Una auténtica quimera que no llegó a materializarse en una máquina física, pero que se hizo realidad en su cálculo infinitesimal.

En cuanto a la máquina aritmética, lo que llamaba la atención era la ejecución de las cuatro operaciones: suma, diferencia, multiplicación y división. En las últimas versiones incluso intentó el cálculo de raíces. El proyecto de Leibniz consistía en automatizar la multiplicación mediante sumas reiteradas, y la división a partir de diferencias sucesivas. Presentó su primer modelo en 1673, aunque no del todo operativo, ante la Real Sociedad de Londres, y durante toda su vida procuró subsanar las diversas deficiencias mecánicas. La máquina aritmética fue una invención brillante, pero nunca se concluyó de forma adecuada durante la vida del sabio, ya que las dificultades eran colosales para la tecnología de engranajes de la época. Los sucesivos intentos de continuas mejoras quedan muy bien datados y reflejados, tanto de forma gráfica como textual, por García Piqueras.

Leibniz introdujo el sistema numérico binario como un símbolo de la creación divina del mundo a partir de la nada, lo que llegó a expresar en la frase «para obtener todo de la nada, uno es suficiente»

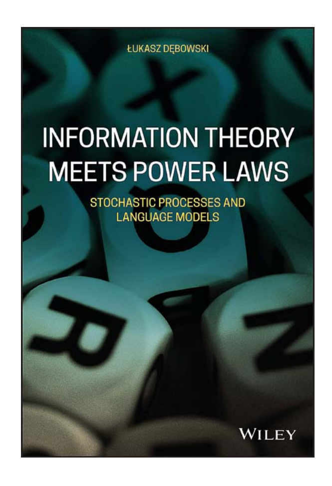
Leibniz introdujo el sistema numérico binario como un símbolo de la creación divina del mundo a partir de la nada, lo que llegó a expresar en la frase «para obtener todo de la nada, uno es suficiente», que formula una íntima conexión entre el significado matemático de los números y su filosofía de las mónadas, las unidades últimas de la existencia. Describió una calculadora mecánica para sumar y multiplicar mediante la combinación del cero y el uno, en la que la caja de engranajes de la máquina aritmética sería reemplazada por pequeñas bolas de metal que rodarían por efecto de la gravedad sobre un plano. Desde el punto de vista lógico, la máquina binaria descrita por Leibniz puede considerarse precursora de la primera computadora binaria, la base sobre la que después se ha edificado el procesamiento de datos, lo que permite señalar a Leibniz como el primer exponente del universo digital.

Antes de entrar en el cálculo infinitesimal —quizá lo más conocido por la mayor parte del público—, García Piqueras pasa revista a los antecedentes históricos de una forma concisa pero muy ilustrativa. Casi al final, el autor desarrolla una interesante digresión sobre la teoría de la complejidad en relación con el pensamiento y el trabajo de Leibniz, quien consideraba más importantes los métodos y los algoritmos que los resultados; sentía pasión por lo mecánico, fue consciente de la enorme utilidad del sistema binario y supo ver la relación existente entre aleatoriedad, complejidad y leyes naturales. Sin embargo, el principio de razón suficiente (que todo sucede por una razón) le impidió avanzar hacia la citada teoría de la complejidad.

Por otro lado, fue el principio de razón suficiente lo que empleó Leibniz en su pugna contra la herejía de Spinoza: «El universo y Dios son una misma cosa». De hecho, utilizó este principio para justificar la existencia de Dios: «Debe haber alguna razón para la existencia del universo, y no es otra que la decisión divina de crear el mejor de los mundos posibles». Así, su dios matemático maneja una función que maximiza el bien del mundo [*véase* «Leibniz y el principio de mínima acción», por Hartmut Hecht; Investigación y Ciencia, diciembre de 2016]. Y lo hace con sus restricciones, ya que las infinitas variables que admite han de ser compatibles entre sí. Los átomos que forman esas variables son las llamadas mónadas de la naturaleza, pertenecientes a un universo inteligible y abarcable, regido por una armonía universal. Vivimos, pues, en el mejor de los mundos posibles, el cual Dios decidió crear a partir de un conjunto de reglas cuando resolvió un problema de optimización matemática. No obstante, Leibniz era muy consciente tanto de la existencia del mal en el mundo como del sufrimiento personal, lo que, frente a la ironía del *Cándido* de Voltaire, dejó patente en alguna de sus obras en forma de optimismo trágico.

Todo esto y más lo encontrará el lector en el libro de García Piqueras, presentado paso a paso y fecha a fecha, en un lenguaje atractivo e inteligible que nos acerca todo lo que reveló la desbordante imaginación de Leibniz para plantear eminentes cuestiones filosóficas, teológicas, mecánicas y matemáticas, así como para abordar otras aún abiertas.

—Pedro Miguel González Urbaneja
Catedrático de matemáticas y autor de libros sobre historia de la matemática



INFORMATION THEORY MEETS POWER LAWS
STOCHASTIC PROCESSES AND LANGUAGE MODELS
Łukasz Dębowski
Wiley, 2020
384 págs.

Hacia una teoría matemática de la comunicación

Un punto de encuentro imprescindible entre la teoría de la información y las leyes del lenguaje

Vaya por delante que este no es un libro de divulgación científica; al menos, no en el sentido habitual del término. La razón es que a veces no hay manera «amable» de abordar ciertos problemas matemáticos: no se puede renunciar a la definición, la ecuación, el teorema y el corolario. Sin embargo, lo que Łukasz Dębowski, matemático de la Academia Polaca de Ciencias, ha hecho en *Information theory meets power laws* merece ser reseñado tanto por su intrínseca interdisciplinariedad como por las consecuencias que puede tener esta obra para quien, a partir de ahora, pretenda introducirse en la modelización del lenguaje y los sistemas de comunicación.

Suele decirse que Claude Shannon fundó la teoría de la información en 1948 con su artículo «A mathematical theory of communication». Un año después, Warren Weaver contextualizó hábilmente el trabajo de Shannon cuando publicaron de manera conjunta *The mathematical theory of communication,* un libro de lectura obligada con dos contribuciones separadas. En su introducción, Weaver sugirió que la teoría matemática de Shannon era extensible a la comunicación biológica, más allá de las máquinas y las telecomunicaciones. Shannon enraizaba con varios precedentes técnicos, pero Weaver vislumbró que el alcance de la teoría de Shannon era mucho mayor, y sus aclaraciones terminológicas serían fundamentales a posteriori [*véase* «Hacia una teoría universal», por Jérôme Segal; Investigación y Ciencia, junio de 2013].

Weaver definió los sistemas que producen una secuencia de símbolos con una cierta probabilidad (como, por ejemplo, las letras de un texto o las notas musicales de una partitura) como procesos estocásticos. De forma que, cuando esa probabilidad depende de los sucesos previos, se tiene un caso especial: la cadena de Markov. Weaver apuntó que, para toda teoría de la comunicación que se precie, de entre las cadenas de Markov resultaba esencial entender un tipo concreto: los procesos ergódicos, aquellos que permiten inferir las propiedades de los símbolos de todo el conjunto analizando únicamente una muestra, siempre que esta sea lo suficientemente grande. Dicho de otra manera: tales procesos nos permiten establecer leyes de base estadística. Weaver entroncó así con la física estadística y explicó la relevancia de los conceptos de información y entropía aplicados a los sistemas de comunicación.

No es de extrañar que James Gleick escogiese relatar la aventura de Shannon en el prólogo de *La información* (Crítica, 2012). Gleick sí trazó un recorrido divulgativo fulgurante en el que revisar la comunicación humana y la emergencia de la teoría de la información, desde la ancestral comunicación acústica de los tambores hasta los enfoques teóricos de las redes complejas de Duncan Watts y Steven Strogatz. El conocido esquema de Shannon de la comunicación dio el salto a la lingüística de la mano de Roman Jakobson, de forma que términos como *emisor*, *receptor*, *canal*, *decodificar* o *ruido* impregnaron su ya clásico *Fundamentals of language* (1956), escrito junto con Morris Halle. Sin embargo, en la lingüística del siglo xx, y quizá como periodo inevitable de toda ciencia en construcción, fueron más quienes usaron de forma metafórica o meramente esquemática la teoría de la información que quienes indagaron en los problemas planteados por Weaver para convertirla en la base matemática del estudio científico de la comunicación.

Mientras tanto, durante el siglo xx se desarrollaba la lingüística cuantitativa, aunque de forma marginal con respecto a las corrientes teóricas dominantes. Fonetistas como Paul Menzerath y lingüistas como George Kingsley Zipf, Gustav Herdan o Gabriel Altmann, entre otros, ahondaron en el análisis y la formalización de las regularidades estadísticas del lenguaje, las llamadas leyes lingüísticas, que también fueron abordadas por matemáticos de la talla de Benoît Mandelbrot o por informáticos como Harold Stanley Heaps. La ley de Zipf es quizá la más conocida: una ley de potencias que relaciona la frecuencia de las palabras con su rango (donde a la palabra más usada de un idioma se le asigna rango 1, a la segunda más usada rango 2, etcétera) [*véase* «Las leyes matemáticas emergentes en el uso del lenguaje», por Álvaro Corral, Isabel Moreno Sánchez y Francesc Font Clos; Investigación y Ciencia, julio de 2016].

Curiosamente, desde otros enfoques al estudio del lenguaje, como el estructuralismo, el generativismo de Chomsky o el conductismo de Skinner, hubo enconados debates teóricos que obviaron e incluso menospreciaron los numerosos datos que analizaba la lingüística cuantitativa. El resurgir de esta disciplina solo ha llegado en pleno siglo xxi, cuando los investigadores se han encontrado con ingentes cantidades de datos lingüísticos que analizar, por un lado, y por otro con máquinas en las que programar interfaces de comunicación.

Dębowski posee un amplio recorrido investigador en la fundamentación de las principales regularidades estadísticas que encontramos en las lenguas humanas. Además de publicaciones especializadas, en su bagaje destaca la reciente edición, junto con Christian Bentz, de *Information theory and language* (MDPI, 2020), un compendio de artículos que da cuenta de lo abigarrada que puede ser la aproximación formal al estudio del lenguaje. No obstante, le faltaba esta obra en la que, capítulo a capítulo, se ha adentrado con orden en la formalización de los patrones que inexorablemente emergen en el lenguaje.

El esfuerzo de Dębowski se centra en establecer los fundamentos matemáticos de la modelización estadística de las lenguas humanas. El primer capítulo es un puente necesario con respecto a la corriente dominante en la academia, a la vez que un guiño humanista a los matemáticos que la lingüística necesita reclutar. Su propuesta no puede dejar indiferente, pues

sus matemáticas colisionarán con algunas ideas preconcebidas que tendrá todo lector avezado. En mi caso, me sigue intrigando cómo Dębowski da preponderancia al internalismo de corte chomskyano, en lugar de inferir las propiedades del lenguaje siguiendo las distribuciones observables y marcando distancias con enfoques que, en algunos casos, se han mostrado inabordables experimentalmente y, por ende, pseudocientíficos en un sentido bungeano. En todo caso, Dębowski nos obliga a revisar nuestros sesgos probabilísticos y cognitivos, algo imprescindible para establecer una auténtica ciencia lingüística libre de ideologías.

En este sentido, esperamos que los temas tratados en *Information theory meets power laws* vayan permeando en los planes de estudio académicos: las leyes lingüísticas y otras propiedades estadísticas de los sistemas de comunicación, las propiedades ergódicas del lenguaje, la entropía y las distribuciones universales, los enfoques algorítmicos de Kolmogórov y Chaitin y sus aplicaciones a la codificación y el aprendizaje automático, así como las propiedades de las leyes de potencias, referidas tanto a la transmisión de la información como a la estructura de los sistemas lingüísticos.

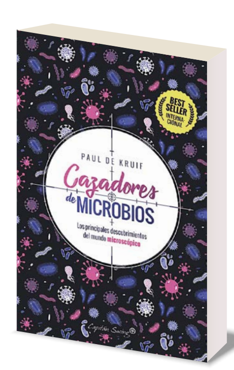
El autor cierra su obra con dos atrevidas propuestas: ataca primero de forma original el problema de la doble articulación del lenguaje, y plantea algunos «modelos de juguete» con los que reencontrar, desde procesos estocásticos, las leyes lingüísticas. El decálogo final de cuestiones abiertas aporta una conclusión estimulante para la imaginación, el divertimento y la investigación futura.

La optimización de las nuevas tecnologías lingüísticas nos ha obligado a mirar atrás, a la teoría de la información y a la lingüística cuantitativa. Y, como la mujer de Lot, nos petrificaremos como estatuas de sal si no somos capaces de desarrollar una teoría integrada del lenguaje, de base matemática, como la que Dębowski brillantemente ha iniciado. Por eso la obra busca desde el título ese imprescindible punto de encuentro entre la teoría de la información y las leyes del lenguaje. Esperemos vivirlo.

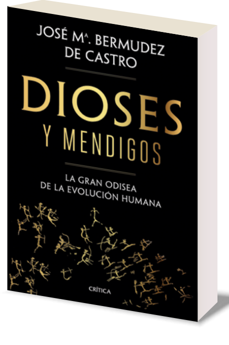
—Antoni Hernández-Fernández
Universidad Politécnica de Cataluña

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



CAZADORES DE MICROBIOS
LOS PRINCIPALES DESCUBRIMIENTOS DEL MUNDO MICROSCÓPICO
Paul de Kruif
Introducción de F. González-Crussí
Capitán Swing, 2021
ISBN: 978-84-122817-2-9
392 págs. (20 €)

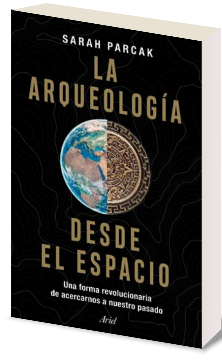


DIOSES Y MENDIGOS
LA GRAN ODISEA DE LA EVOLUCIÓN HUMANA
José María Bermúdez de Castro
Crítica, 2021
ISBN: 978-84-9199-278-3
448 págs. (22,90 €)




DISEÑANDO FÁRMACOS
LO QUE SIEMPRE QUISO SABER Y NO SE ATREVIÓ A PREGUNTAR
Javier Burgos
Next Door Publishers, 2021
ISBN: 978-84-122556-2-1
278 págs. (20 €)

EXOPLANETAS Y ASTROBIOLOGÍA: PLUS ULTRA
David Barrado Navascués
Catarata, 2021
ISBN: 978-84-1352-190-9
128 págs. (12 €)



LA ARQUEOLOGÍA DESDE EL ESPACIO
UNA FORMA REVOLUCIONARIA DE ACERCARNOS A NUESTRO PASADO
Sarah Parcak
Ariel, 2021
ISBN: 978-84-344-3328-1
424 págs. (21,90 €)



LA MATEMÁTICA Y LA CIENCIA OCULTA
Fernando Chamizo Lorente
Ediciones Universidad Autónoma de Madrid, 2021
ISBN: 978-84-8344-737-6
164 págs. (12 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

ABRIL

1971

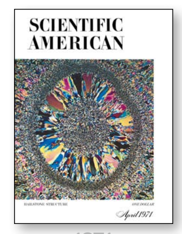
Vidrio moderno

«En EE.UU., el tradicional método de fabricación del vidrio plano está siendo rápidamente sustituido por un proceso que rinde un vidrio de alta calidad mediante la flotación en un baño de estaño fundido. El método de flotación, desarrollado en Inglaterra hace unos diez años por el fabricante Pilkinson Brothers e introducido en EE.UU. por PPC Industries, elimina las operaciones mecánicas de amolado y pulido que deben realizarse con el sistema tradicional. Se trata, pues, de un procedimiento notablemente más barato. En el proceso de flotación, el vidrio, al salir del horno de fusión, fluye horizontalmente al baño de flotación, un tanque rectangular de más de treinta metros de largo y lo bastante ancho para admitir bandas de la mayor anchura estándar comercial. La banda flota en el estaño fundido, que presenta una superficie perfectamente plana.»

1921

Moviendo masas

«En la terminal Grand Central, en el centro de Nueva York, se controlan del orden de seiscientos trenes de pasajeros cada día. Esos trenes deben ser asignados a las vías que en la estación les corresponden, con todos los cambios de aguja y la señalización que tales operaciones implican. Y si aún estuvieran en boga las hace tiempo obsoletas bifurcaciones manuales, cada una con su propio guardagujas, harían falta cientos de operadores en servicio continuo para accionar esas agujas. El actual procedimiento de gestionar los desvíos y cruces y los semáforos desde un punto medio, llamado centro de enclavamiento, ha permitido que un reducido grupo de operadores, a las órdenes de un "director", controlen esas operaciones sobre un área muy vasta.»



1971



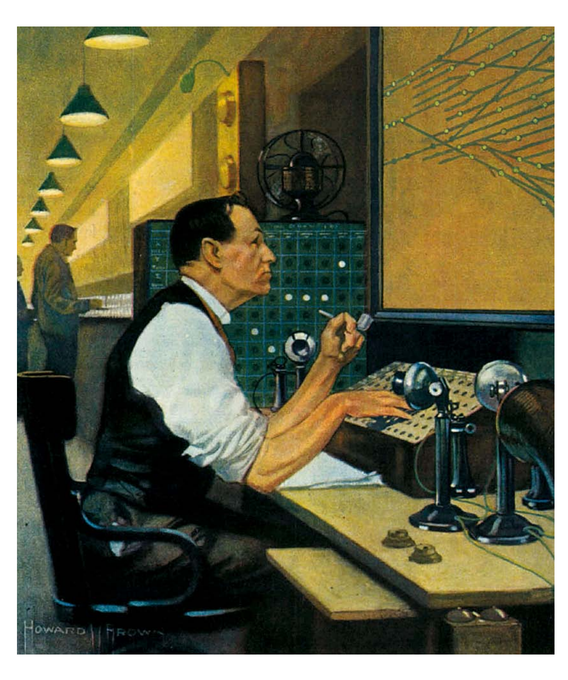
1921



1871

Una idea sobria

«De la miríada de problemas generados por la Prohibición, ninguno desconcierta más que el destino de las cervecerías. Aparte de fabricar refrescos, cuya demanda es apenas limitada, no parece haber un uso adecuado en el que encaje la planta y la maquinaria de una cervecería. Aún peor, la capacitación profesional del personal es igualmente inútil. Pero el dueño de una famosa, y antigua, cervecería de Nueva York cree haber hallado una solución: ¡champiñones! No parece, a primera vista, que la cerveza tenga mucho que ver con las setas. Pero la levadura es prima carnal de estas; así, una planta cervecera, con sus equipos de refrigeración y su interior tenuemente iluminado, resulta admirablemente apta para cultivar champiñones cuando se sustituyen las tinas de cerveza por estanterías de cultivo.»



1921: Antes de la era digital, el funcionamiento de los trenes lo dirigían equipos eléctricos.

1871

La Tierra: ¿materia sólida o fundida?

«Aunque antaño la teoría de que la Tierra es una esfera de materia fundida rodeada de una fina corteza de materia sólida la exponían los geólogos casi por todo el orbe, en años recientes se han aducido razones en contra, las cuales, al parecer, propugnan que la Tierra es en su totalidad una masa sólida o casi sólida. Se plantea, por ejemplo, si es posible que esa fina corteza se mantenga sólida y no acabe fundiéndose y siendo absorbida por la enorme masa de materia fundida bajo ella. Es evidente que, en la superficie, una corteza no podría ni siquiera empezar a formarse, salvo que en ese momento la misma esfera estuviera cediendo a la atmósfera circundante más calor del que pudiera suministrar procedente de sus partes más internas.»

Trabajar como un perro

«Según el *Mechanic's Magazine*, las puntas de París procedentes de Charleville se producen en parte en las máquinas de grandes fábricas y en parte en una multitud de pequeños talleres repartidos por pueblos densamente habitados. Estos pueblos, como Neufmanil, los habitan no solo personas, sino también una clase obrera canina. El trabajo de los perros, cuya jornada está regulada tan exactamente como la de sus colegas humanos, consiste en accionar los fuelles que insuflan aire a los hornos de los talleres. Para ello hacen girar una rueda desde su interior, como ardillas en una jaula.»

Pasas de California

«En California, el secado de uvas para obtener pasas se está convirtiendo en una industria importante, pues el alto contenido en azúcar de las uvas americanas las hace muy apropiadas para ese fin.»

Nota de los editores: *Lamentamos comunicar el fallecimiento de Daniel C. Schlenoff, responsable de esta sección, y aprovechamos para agradecerle su labor. Durante más de 20 años ha indagado en los archivos de* Scientific American *para ofrecernos los extractos más sorprendentes y curiosos de esta secular publicación.*

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXIV, N.º 17, 23 DE ABRIL DE 1921



BIOLOGÍA

Los secretos de la metamorfosis

Xavier Bellés

Hace unos 400 millones de años los insectos inventaron la metamorfosis. Empiezan a desvelarse el origen y la evolución de tan exitosa vía de desarrollo.



COSMOLOGÍA

Las galaxias enanas: un plancton cósmico

Oliver Müller

Los numerosos sistemas estelares pequeños en nuestro entorno galáctico se comportan de una manera muy diferente a como predicen las simulaciones. Ello no encaja en el modelo cosmológico estándar.

ARQUEOLOGÍA

Epidemias que moldearon el mundo

James P. Close

El ADN procedente de bacterias y virus hallados en restos humanos muestra el modo en que los patógenos ayudaron a derrumbar imperios y a transformar civilizaciones.

ECOLOGÍA

Los estragos de la contaminación lumínica

Emmanuel Desouhant, Thierry Lengagne y Nathalie Mondy

Los lugares en los que se conserva la oscuridad nocturna son cada vez más raros. La luz artificial nocturna perturba la vida de los animales hasta el punto de erosionar la biodiversidad.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes, El complejo ataque de la avispa esmeralda y Ángeles y mariposas de mar, bioindicadores de la acidificación*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes, Más cerca de la fusión y Contaminación espacial*; Ernesto Lozano: *Resuelto un persistente misterio de la fisión nuclear*; Gonzalo Claros: *¿Dejará de transmitirse la COVID-19 gracias a las vacunas?*; Javier Grande: *El problema de la constante cosmológica*; Pedro Pacheco: *Cuestión de testosterona*; Xavier Roqué: *La controversia del Hombre de Orce*; Anna Romero: *Los cuidadores de los suelos*; Fabio Teixidó: *Sin madera para las guitarras eléctricas*; J. Vilardell: *Hacia el horizonte y más allá y Hace...*; Bartolo Luque: *Los secretos del número 42.*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España